Е. П. Гизила

РАСЧЕТ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГО-СИСТЕМ

ИЗДАНИЕ 3-е,
ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования УССР в качестве учебного пособия для студентов электроэнергетических факультетов вузов

ИЗДАТЕЛЬСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ВИЩА ШКОЛА»
ГОЛОВНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
КИЕВ — 1974

6П2.11
Г46

УДК 621.311.001.2-52(075.8)

Расчет устройств автоматики энергосистем. Гизила Е. П. Издательское объединение «Вища школа», 1974, с. 344.

Излагаются практические расчеты устройств автоматики по основным разделам курса автоматизации энергетических систем. В каждой из глав книги в сжатом виде даются необходимые теоретические обоснования, расчетные соотношения, схемы устройств. Приводятся порядок расчета и один или несколько подробно разработанных числовых примеров.

Предназначена в качестве учебного пособия для студентов при выполнении ими упражнений, курсовых и дипломных проектов по соответствующему курсу, а также может быть полезной для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами автоматизации энергетических систем.

Табл. 14. Ил. 157. Библиогр. 92.

Редакция литературы по энергетике, электротехнике, автоматике
Зав. редакцией *В. Ф. Хмель*

Г $\frac{30306-325}{М211(04)-74}$ 64—74

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основой дальнейшего повышения производительности труда является, как известно, комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Это относится ко всем отраслям промышленности, в том числе и к электроэнергетике, развитие которой идет по пути сооружения весьма мощных электрических станций, образования большого числа разветвленных энергетических систем с последующим объединением их в Единую энергетическую систему Советского Союза.

Особенностью производства электрической энергии является строгая одновременность ее выработки и потребления, огромная скорость передачи ее на расстояние. Современные электрические станции, подстанции, линии электропередачи и другие установки энергетических систем отличаются высокой степенью автоматизации всех процессов — синхронизации, включения, регулирования, защиты.

Высшая техническая школа Советского Союза, отражая основные направления в развитии народного хозяйства, уделяет особое внимание подготовке молодых специалистов в области автоматизации производственных процессов. Много внимания уделяется вопросам закрепления получаемых студентами знаний, умений, навыков. Важное место в этом деле занимает самостоятельная работа студентов. Много усилий направляется сейчас на то, чтобы научить студента применять на практике положения теории, привить ему навыки к инженерным расчетам, к конкретному мышлению.

При составлении учебного пособия использованы работы научно-исследовательских организаций, руководящие материалы Технического управления Министерства энергетики и электрификации СССР, материалы эксплуатации энергетических систем, информация заводов, периодическая и другая литература.

Настоящее издание значительно расширено и дополнено за счет переработки третьей главы о расчете автоматического пуска асинхронных двигателей, четвертой главы о расчете автоматического пуска синхронных двигателей и компенсаторов, введения новых разделов

о критерии устойчивости И. А. Вышнеградского и о методе логарифмических частотных характеристик в четырнадцатой главе. Введены шестнадцатая глава о расчете переходного процесса с помощью преобразования Лапласа и семнадцатая глава о расчете переходного процесса систем автоматики при помощи АВМ, а также увеличен материал приложения.

Автор приносит благодарность О. Г. Пискунову, написавшему семнадцатую главу, и рецензенту А. А. Малиновскому за ценные замечания, способствующие улучшению содержания книги.

Все замечания и пожелания просьба направлять по адресу: 252054, Киев, 54, ул. Гоголевская, 7, Головное издательство издательского объединения «Вища школа».

Глава первая

РАСЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С УСКОРЕНИЕМ В ФУНКЦИИ Э.Д.С.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

На современных электростанциях наряду с синхронными и асинхронными двигателями с короткозамкнутыми роторами применяются двигатели постоянного тока. Целесообразность применения последних на тепловых электростанциях объясняется тем, что скорость их вращения можно легко регулировать в широких пределах. Это важно для таких устройств, как питатели пыли на пылеугольных станциях, цепные решетки на торфяных станциях и др. На гидростанциях применяются двигатели постоянного тока как с параллельным, так и последовательным возбуждением, мощность которых не превышает 100 Вт.

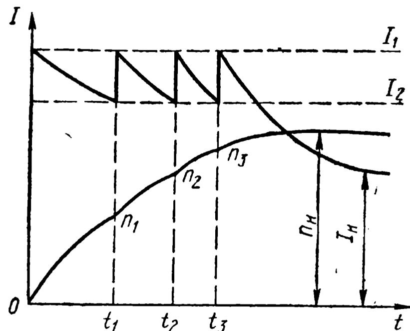


Рис. 1-1. Диаграмма пуска двигателя с трехступенчатым ускорением.

Все двигатели на электростанциях снабжаются соответствующими устройствами пуска, останова, контроля нормального режима работы, а иногда и устройством регулирования скорости вращения*.

Так как сопротивления якорей двигателей мощностью до 0,5 кВт имеют повышенное по сравнению с мощными двигателями значение и к тому же допускают большие пики тока по отношению к номинальному, то их можно включить в сеть непосредственно без пусковых сопротивлений [1-1]. Прямой пуск двигателей мощностью свыше 0,5 кВт не рекомендуется вследствие чрезмерно больших пусковых токов, вызывающих подгорание коллекторов и щеток, а также значительное электродинамическое усилие на обмотке и большой момент на валу двигателя.

На рис. 1-1 приведена пусковая диаграмма двигателя, представляющая собой изменение пускового тока $I = f(t)$ при ступенчатом выведении так называемого пускового сопротивления. Ток изменяется от максимального значения I_1 до выбранного минимального значения I_2. При каждом снижении пускового тока до значения I_2 выводится очередная ступень пускового сопротивления, и ток мгновенно возрастает до его максимального значения I_1.

* Эти устройства подробно рассматриваются в специальных курсах электрических машин, электропривода и релейной защиты.

Двигатель включается в сеть в момент времени $t = 0$ при полном сопротивлении и скорости вращения $n = 0$. Первая ступень сопротивления выводится в момент времени t_1 при скорости вращения n_1, вторая — в момент времени t_2 при скорости вращения n_2 и т.д.

В соответствии с рассматриваемой пусковой диаграммой пуск двигателя может быть выполнен либо вручную, либо автоматически. При пуске вручную пусковое сопротивление выводится с учетом показаний амперметра в цепи якоря, и, поскольку при этом происходит контроль тока, можно сказать, что производится пуск двигателя с ускорением в функции тока.

При пуске двигателя автоматически может осуществляться либо контроль тока (пуск с ускорением в функции тока), либо контроль времени (пуск с ускорением в функции времени). Скорость вращения двигателя непосредственно не контролируется из-за сложности необходимой для этого аппаратуры. Контроль можно осуществить косвенным путем, т.е. измерением других параметров, однозначно связанных со скоростью. У двигателей постоянного тока таким параметром является э. д. с. (пуск с ускорением в функции э. д. с.), а у синхронных и асинхронных двигателей — частота тока в роторной цепи (пуск с ускорением в функции частоты).

ЕСТЕСТВЕННАЯ И ИСКУССТВЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Естественная характеристика — это, как известно, характеристика $n = f(M)$ или $n = f(I_я)$, которая получается при номинальных значениях напряжения и магнитного потока и при отсутствии в якорной цепи внешних сопротивлений. Естественную характеристику можно построить по двум точкам, одна из которых соответствует номинальному моменту $M_н$ (или номинальному току якоря $I_{я.н}$) и номинальной скорости $n_н$, а другая — моменту M, равному нулю (или току $I_я = 0$), и скорости идеального холостого хода n_0 (рис. 1-2). Номинальный момент $M_н$ (или номинальный ток $I_{я.н}$) и номинальная скорость $n_н$ двигателя определяется по его паспортным данным, а скорость вращения идеального холостого хода [1-2] — по формуле

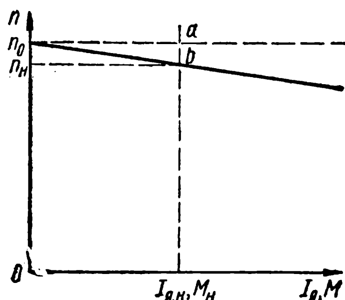


Рис. 1-2. Естественная характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

$$n_0 = n_н \frac{U}{U - I_{я.н} R_я}, \qquad (1.1)$$

где U — номинальное напряжение двигателя;

$R_я$ — внутреннее сопротивление якоря двигателя.

Если сопротивление якоря $R_я$ неизвестно, то его можно определить ориентировочно, принимая, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке обусловлена потерями в меди якоря, т. е.

$$I^2_{я. н} R_я = 0{,}5UI_{я. н}(1 - \eta_н),$$

откуда

$$R_я = \frac{0{,}5U(1 - \eta_н)}{I_{я. н}}. \tag{1.2}$$

Входящий в формулу (1.2) к. п. д. при номинальной нагрузке представляет собой отношение

$$\eta_н = \frac{P_{вал}}{P}, \tag{1.3}$$

где $P_{вал}$ — отдаваемая мощность двигателя на валу, кВт;
$P = UI_{я. н}$ — мощность двигателя, кВт.

Практически естественную характеристику удобно строить в относительных величинах (или в процентах). При этом она будет представляться прямой

$$n_* = f(M_*), \tag{1.4}$$

или

$$n_* = f(I_{*я}), \tag{1.5}$$

где $n_* = \frac{n}{n_0}$ — скорость вращения в относительных единицах;

$M_* = \frac{M}{M_н}$ — момент в относительных единицах;

$I_{*я} = \frac{I_я}{I_{я. н}}$ — ток якоря в относительных единицах.

Уравнение естественной характеристики (1.5) в общем виде, т. е. при произвольных значениях тока якоря $I_я$ и скорости вращения n, может быть получено из уравнения скорости вращения идеального холостого хода (1.1) при номинальном напряжении U. При этом уравнение (1.1) примет вид

$$n_0 = n\frac{U}{U - I_я R_я},$$

откуда

$$n = n_0 \frac{U - I_я R_я}{U} = n_0\left(1 - \frac{I_я R_я}{U}\right) = n_0\left(1 - \frac{I_я R_я}{I_{я. н} R_{я. н}}\right) = n_0(1 - I_{*я} R_{*я}),$$

или

$$\frac{n}{n_0} = 1 - I_{*я} R_{*я},$$

т. е.

$$n_* = 1 - I_{*я} R_{*я}, \tag{1.5, а}$$

где $R_{я. н} = \frac{U}{I_{я. н}}$ — номинальное сопротивление двигателя в омах.

Уравнение скорости (1.1), выраженное через номинальные параметры (скорость вращения, напряжение и ток), можно записать в виде

$$n_{н} = n_0 \frac{U - I_{я.н} R_я}{U} = n_0 \left(1 - \frac{I_{я.н} R_я}{U}\right).$$

Разделив левые и правые части этого уравнения на n_0, получим

$$n_{*н} = 1 - \frac{I_{я.н} R_я}{U},$$

или

$$n_{*н} = 1 - \frac{R_я}{\frac{U}{I_{я.н}}} = 1 - \frac{R_я}{R_{я.н}} = n_{*0} - R_{*я},$$

откуда

$$n_{*0} - n_{*н} = R_{*я}, \tag{1.6}$$

где $n_{*н} = \frac{n_н}{n_0}$ — номинальная скорость вращения в относительных единицах;

$R_{*я} = \frac{R_я}{R_{я.н.}}$ — сопротивление якоря в относительных единицах.

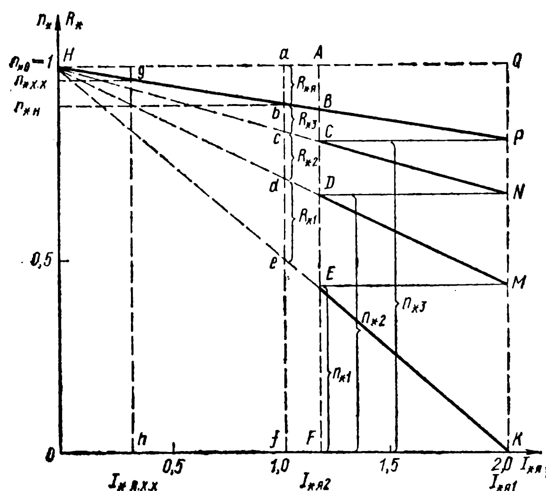


Рис. 1-3. Механические характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением в относительных единицах (пусковая диаграмма).

Из выражения (1.6) видно, что относительный перепад скорости вращения (при переходе от холостого хода к полной номинальной нагрузке) численно равен сопротивлению якоря в относительных единицах $R_{*я}$.

Из изложенного следует, что естественная характеристика (1.6) рассматриваемого двигателя в относительных единицах при номинальных параметрах может быть построена по двум точкам (рис. 1-3, прямая PH), координаты которых

$$n_{*0} = 1; \; I_{*я} = 0$$

и

$$n_{*н} = n_{*0} - R_{*я} = 1 - R_{*я}; \; I_{*я} = 1.$$

Из этой характеристики видно, что чем больше внутреннее сопротивление якоря двигателя, тем больше снижение скорости вращения

(вследствие возрастания падения напряжения в цепи якоря) и тем больший наклон имеет естественная характеристика, т. е. меньше ее жесткость.

При построении искусственных механических характеристик допускают, что при любых внешних сопротивлениях в цепи якоря эти характеристики прямолинейны и пересекаются в одной точке H (рис. 1-3), координаты которой $n_{*0} = 1$ и $I_{*я} = 0$.

Искусственные характеристики строят в следующем порядке. Вначале находят количество ступеней пускового сопротивления (если оно не задано). Для этого задаются допустимыми из условий разворота двигателя колебаниями пускового тока в пределах от $I_{*я1}$ до $I_{*я2}$. При этом ток $I_{*я2}$ должен быть несколько больше тока якоря, при котором развиваемый двигателем момент равен статическому моменту сопротивления, а ток $I_{*я1}$ должен быть несколько меньше тока якоря, при котором развиваемый двигателем момент равен максимально допустимому пусковому моменту. Варьируя допустимые колебания пускового тока якоря (после нескольких пробных построений), устанавливают число ступеней пускового сопротивления, соответствующее числу горизонтальных прямых перехода с одной характеристики на другую. В частности, на рис. 1-3 получаем три ступени пускового сопротивления R_{*1}, R_{*2} и R_{*3} при трех искусственных характеристиках KH, MH, NH и естественной характеристике PH.

Относительные перепады ab, bc, cd и de скорости вращения между характеристиками при номинальном токе $I_{*я} = 1$ одновременно представляют собой относительные значения ступеней пускового сопротивления или сопротивления якоря. При этом

$$ab = R_{*я};\; bc = R_{*3};\; cd = R_{*2};\; de = R_{*1}.$$

Отрезок af представляет собой величину номинального сопротивления двигателя $R_{я.н}$ в омах, принятую за единицу относительного сопротивления $R_{*я.н}$. Тогда значения ступеней пускового сопротивления в омах:

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= R_{*1}R_{я.н};\\ R_2 &= R_{*2}R_{я.н};\\ R_3 &= R_{*3}R_{я.н};\\ &\cdots\cdots\\ R_n &= R_{*n}R_{я.н}. \end{aligned}\right\} \tag{1.7}$$

Полное пусковое сопротивление в омах

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n. \tag{1.8}$$

Отрезок AF представляет собой величину скорости идеального холостого хода, принимаемую за единицу относительной скорости, или величину этой же скорости в оборотах в минуту (n_0). Тогда скорости

вращения, при которых происходит закорачивание ступеней пускового сопротивления, в оборотах в минуту:

$$\left.\begin{aligned} n_1 &= n_{*1} n_0; \\ n_2 &= n_{*2} n_0; \\ n_3 &= n_{*3} n_0; \\ & \dots \\ n_n &= n_{*n} n_0, \end{aligned}\right\} \qquad (1.9)$$

где

$$n_{*1} = FE;\ n_{*2} = FD;\ n_{*3} = FC.$$

РУЧНОЙ ПУСК ДВИГАТЕЛЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Принципиальная схема ручного пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением показана на рис. 1-4. Пуск двигателя заключается в следующем. Сначала замыкаются двухполюсные выключатели Р и 4Р. Двигатель начинает разворачиваться и увеличивать скорость по искусственной характеристике KH до точки E, соответствующей скорости n_{*1} (рис. 1-3). Затем закорачивают первую ступень пускового сопротивления R_1 путем замыкания выключателя 1Р. Так как благодаря инерции системы скорость двигателя мгновенно измениться не может, а величина пускового тока растет быстро, то при этом переход на новую искусственную характеристику MH произойдет практически по линии EM, параллельной оси абсцисс.

Рис. 1-4. Принципиальная схема ручного пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

Далее двигатель будет ускоряться по характеристике MH до точки D, соответствующей скорости n_{*2}. При этом замыкается выключатель 2Р и происходит переход на характеристику NH. Последний этап пуска двигателя наступает при замыкании выключателя 3Р, когда происходит переход на естественную характеристику PH, на которой устанавливается скорость вращения, соответствующая току (или моменту нагрузки) двигателя. В частности, при нагрузке, соответствующей току якоря $I_{*я} = 1$, двигатель будет работать с номинальной скоростью $n_{*н}$, равной отрезку bf.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПУСК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

При автоматическом пуске двигателей закорачивание ступеней пускового сопротивления R_1, R_2, R_3 (рис. 1-4) происходит автоматически при помощи специальных устройств, состоящих из контакторов и реле, собранных по определенной схеме (рис. 1-5).

Пуск двигателя. При включении выключателя Р получает питание обмотка возбуждения ОВ двигателя. При этом срабатывает так называемое реле ослабления поля РОП; оно замыкает свои контакты в цепи обмотки линейного контактора Л и этим подготавливает автоматику пуска к действию.

Двигатель может запускаться как от руки (нажатием кнопки «Пуск»), так и от других устройств автоматики (например, технологической) путем замыкания контактов реле контроля режима 1 РКР. В обоих случаях замыкается цепь питания обмотки линейного контактора Л, который срабатывает и своими контактами $Л_1$ и $Л_2$ подключает цепь якоря двигателя к сети. Одновременно замыкаются кон-

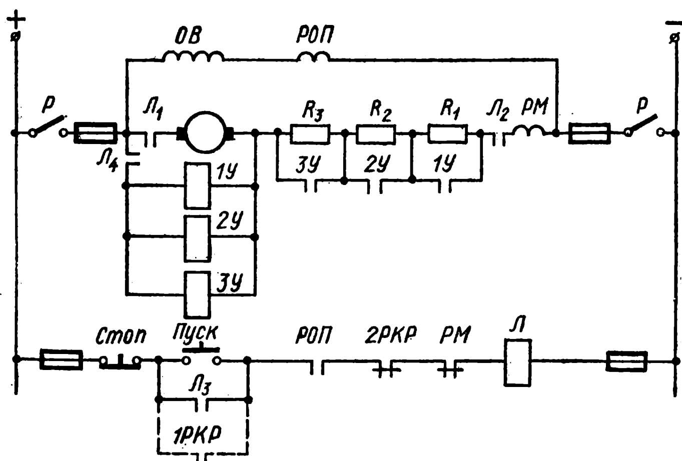


Рис. 1-5. Принципиальная схема автоматического пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с трехступенчатым ускорением в функции э. д. с.

такты $Л_3$ и $Л_4$, первый из которых закорачивает кнопку «Пуск», обеспечивая при этом самоудерживание линейного контактора Л, а второй замыкает цепи обмоток контакторов ускорения 1У, 2У и 3У. Получив питание, якорь двигателя начинает разворачиваться, увеличивая скорость по прямой KE (рис. 1-3). По мере увеличения скорости вращения якоря увеличивается и создаваемая им э.д.с., а также возрастает напряжение, подводимое к обмоткам контакторов ускорения 1У, 2У и 3У, в общем случае равное

$$U_{*у} = E_* + I_{*я}G_{*я}.$$

В точке E, когда скорость двигателя достигнет величины n_{*1}, напряжение на обмотках контакторов ускорения достигнет значения

$$U_{*у1} = E_{*1} + I_{*я2}R_{*я}, \tag{1.10}$$

где E_{*1} — э.д.с., создаваемая вращением якоря при скорости вращения n_{*1}. На рис. 1-3 э.д.с. E_{*1} изображается отрезком FE в долях от номинального напряжения $U_* = 1$.

Если напряжение срабатывания контактора ускорения 1У выбрать равным $U_{*у1}$, то он сработает и закоротит сопротивление R_1. Произойдет переход на новую механическую характеристику MH.

Далее двигатель будет ускоряться, и в точке D, соответствующей скорости n_{*2}, напряжение на обмотках контакторов ускорения возрастет до значения

$$U_{*у2} = E_{*2} + I_{*я2}R_{*я}, \qquad (1.11)$$

где E_{*2} — э.д.с., создаваемая вращением якоря при скорости вращения n_{*2}. На рис. 1-3 э.д.с. E_{*2} изображается отрезком FD в долях от напряжения $U_* = 1$.

Если по аналогии с предыдущим напряжение срабатывания контактора ускорения 2У выбрать равным $U_{*у2}$, то при скорости вращения n_{*2} он сработает и закоротит сопротивление R_2. Произойдет переход на следующую искусственную характеристику NH.

Двигатель будет продолжать ускоряться дальше, и в точке C, соответствующей скорости вращения n_{*3}, напряжение на обмотках контакторов ускорения достигнет значения

$$U_{*у3} = E_{*3} + I_{*я2}R_{*я}, \qquad (1.12)$$

где E_{*3} — э.д.с., создаваемая вращением якоря при скорости вращения n_{*3}. На рис. 1-3 э.д.с. E_{*3} изображается отрезком FC в долях от $U_* = 1$.

По аналогии с предыдущим напряжение срабатывания контактора ускорения 3У должно быть выбрано равным $U_{*у3}$. Тогда при скорости вращения n_{*3} он сработает и закоротит сопротивление R_3. Произойдет переход на следующую характеристику, в данном случае уже на естественную характеристику PH. Двигатель будет ускоряться дальше до тех пор, пока скорость вращения будет соответствовать току якоря, при котором развиваемый двигателем вращающий момент станет равным механическому моменту сопротивления. В частности, при вращающем моменте, соответствующем току $I_{*я} = 1$, скорость вращения двигателя установится равной номинальной $n_{*н}$, соответствующей точке b на естественной характеристике PH.

Если же двигатель пускается на холостом ходу, то установившаяся скорость вращения его достигнет значения скорости холостого хода $n_{*х.х}$, соответствующей отрезку gh при токе холостого хода якоря $I_{*я.х.х}$ (рис. 1-3).

Останов двигателя. Двигатель может быть остановлен как от руки (нажатием кнопки «Стоп»), так и автоматически. Автоматически двигатель останавливается в различных аварийных условиях: при ослаблении поля (срабатывает реле РОП), при нарушении режима (срабатывает реле контроля режима 2РКР), при недопустимой перегрузке (срабатывает реле максимальной защиты РМ). Кнопка «Стоп» и контакты РМ, РОП, 2РКР защитных реле размыкают цепь питания линейного контактора Л (рис. 1-5).

Рассмотренный метод расчета пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с ускорением в функции э.д.с. является графическим. Аналитический метод при трех и выше ступенях ускорения становится неудобным из-за возрастающей сложности.

Пример. *Дано:* электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением мощностью 12 кВт, 725 об/мин, $U = 220$ В, $I_{я.н} = 62$ А, $R_я = 0{,}162$ Ом, имеющий автоматический пуск с ускорением в функции э. д. с., пускается под нагрузкой, составляющей 80% ее номинального значения.

Требуется: 1. Определить число ступеней пускового сопротивления и их величину при условии, чтобы пик пускового тока не превышал двухкратного значения номинального тока $I_{я.н}$.

2. Определить скорости вращения, при которых происходит закорачивание ступеней пускового сопротивления.

3. Определить напряжения срабатывания контакторов ускорения 1У, 2У и т. д.

Решение. Скорость идеального холостого хода двигателя определяем по формуле (1.1).

$$n_0 = n_н \frac{U}{U - I_{я.н}R_я} = 725 \frac{220}{220 - 62 \cdot 0{,}162} = 760 \text{ об/мин},$$

или, принимая ее за единицу, можем записать

$$n_{*0} = 1.$$

Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{я.н} = \frac{U}{I_{я.н}} = \frac{220}{62} = 3{,}55 \text{ Ом}.$$

При этом сопротивление якоря, отнесенное к номинальному сопротивлению двигателя,

$$R_{*я} = \frac{R_я}{R_{я.н}} = \frac{0{,}162}{3{,}55} = 0{,}046.$$

Тогда номинальную скорость вращения двигателя в относительных единицах находим с учетом (1.6)

$$n_{*н} = n_{*0} - R_{*я} = 1 - 0{,}046 = 0{,}954.$$

По координатам двух точек

$$n_{*0} = 1; \quad I_{*я} = 0$$

и

$$n_{*н} = 0{,}954; \quad I_{*я} = 1$$

строим естественную характеристику двигателя в относительных единицах в виде прямой *PH* (рис. 1-6).

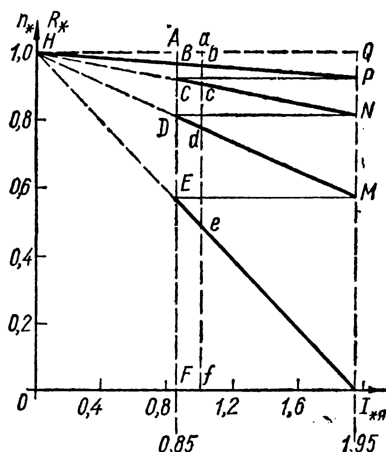


Рис. 1-6. Построение механических характеристик двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

Определяем число ступеней пускового сопротивления. Для этого задаемся допустимыми из условий пуска и разворота двигателя значениями пускового тока. Варьируя эти значения, после нескольких пробных построений устанавливаем число ступеней, равное трем. При этом

$$I_{*я1} = 1{,}95 < 2,$$

а

$$I_{*я2} = 0{,}85 > 0{,}8,$$

где 0,8 — относительный ток якоря, соответствующий заданной нагрузке двигателя.

Значения ступеней пускового сопротивления в относительных единицах получаем как перепады скорости между характеристиками, т. е.

$$R_{*1} = de = 0{,}295;$$
$$R_{*2} = cd = 0{,}120;$$
$$R_{*3} = bc = 0{,}054.$$

Тогда по выражению (1.7) эти сопротивления при номинальном сопротивлении двигателя $R_{я.\,н} = 3{,}55$ Ом будут

$$R_1 = R_{*1}R_{я.\,н} = 0{,}295 \cdot 3{,}55 = 1{,}05 \text{ Ом};$$
$$R_2 = 0{,}12 \cdot 3{,}55 = 0{,}425 \text{ Ом};$$
$$R_3 = 0{,}054 \cdot 3{,}55 = 0{,}192 \text{ Ом}.$$

Полное пусковое сопротивление

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 1{,}050 + 0{,}425 + 0{,}192 = 1{,}667 \text{ Ом}.$$

Скорости вращения, при которых закорачиваются ступени пускового сопротивления, определим по рис. 1-6 с учетом соотношения (1.9):

$$n_1 = n_{*1}n_0 = 0{,}57 \cdot 760 = 433 \text{ об/мин};$$
$$n_2 = n_{*2}n_0 = 0{,}81 \cdot 760 = 615 \text{ об/мин};$$
$$n_3 = n_{*3}n_0 = 0{,}92 \cdot 760 = 700 \text{ об/мин}.$$

Напряжения срабатывания контакторов ускорения 1У, 2У, 3У (рис. 1-5) в относительных единицах определим по формулам (1.10)—(1.12):

$$U_{*у1} = E_{*1} + I_{*я2}R_{*я} = 0{,}57 + 0{,}85 \cdot 0{,}046 = 0{,}57 + 0{,}039 = 0{,}609;$$
$$U_{*у2} = E_{*2} + I_{*я2}R_{*я} = 0{,}81 + 0{,}039 = 0{,}849;$$
$$U_{*у3} = E_{*3} + I_{*я2}R_{*я} = 0{,}92 + 0{,}039 = 0{,}959.$$

В вольтах эти напряжения соответственно будут

$$U_{у1} = U_{*у1}U = 0{,}609 \cdot 220 = 134;$$
$$U_{у2} = 0{,}849 \cdot 220 = 187;$$
$$U_{у3} = 0{,}959 \cdot 220 = 210.$$

Глава вторая

РАСЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С УСКОРЕНИЕМ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время для двигателей постоянного тока наиболее распространенной является система пуска с ускорением в функции времени. Эта система работает безотказно как при изменении напряжения, так и при изменении нагрузки и с этой точки зрения является наиболее надежной. Недостатком системы является значительное в общем случае количество пусковой аппаратуры с ее контактами и блок-контактами, что несколько усложняет схему.

Упрощенная схема автоматического пуска двигателя с ускорением в функции времени с двумя ступенями ускорения показана на рис. 2-1. Первая ступень ускорения управляется с помощью реле ускорения

1РУ, имеющего замедление при снятии питания благодаря наличию медной гильзы, надетой на сердечник реле. Вторая ступень управляется с помощью реле ускорения 2РУ, которое может и не иметь медной гильзы, поскольку здесь замедление получается за счет постепенного спадания магнитного потока в замкнутой накоротко катушке реле.

Схема работает следующим образом. При включении выключателя Р замыкаются цепи обмотки возбуждения ОВ двигателя и обмотки реле ускорения 1РУ. При этом срабатывает реле ослабления поля РОП и замыкает свой контакт в цепи линейного контактора Л, а также срабатывает реле 1РУ и размыкает цепь питания контакторов ускорения 1У,

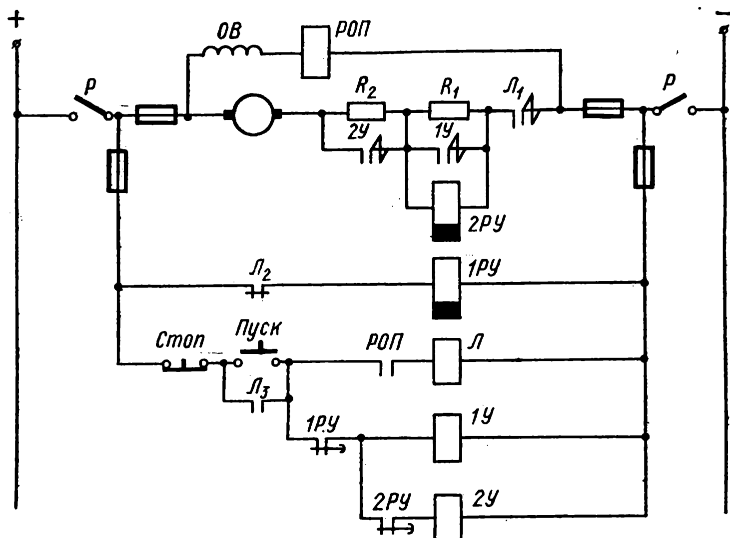


Рис. 2-1. Упрощенная принципиальная схема автоматического пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с двухступенчатым ускорением в функции времени.

2У. При нажатии кнопки «Пуск» срабатывает линейный контактор Л; своим главным контактом $Л_1$ он замыкает цепь якоря при полном пусковом сопротивлении, блок-контактом $Л_2$ размыкает цепь питания реле ускорения 1РУ, а блок-контактом $Л_3$ шунтирует кнопку «Пуск». От падения напряжения на ступени R_1 получает питание и срабатывает реле ускорения 2РУ, размыкая свой контакт в цепи контактора ускорения 2У, а реле 1РУ, спустя заданное замедление, замыкает свой контакт в цепи контактора ускорения 1У. К этому времени пусковой ток снизится до заданного минимального значения.

Получив питание, контактор 1У срабатывает, выводит первую ступень пускового сопротивления R_1 и одновременно закорачивает обмотку реле ускорения 2РУ. Ток в цепи двигателя скачком возрастает и затем снова затухает. Спустя заданное замедление, реле 2РУ также срабатывает, подает питание на контактор ускорения 2У, который срабатывает и выводит вторую ступень пускового сопротивления R_2.

Ток в цепи двигателя снова скачком возрастает, затем медленно затухает и в конце пуска принимает нормальное значение.

Двигатель может быть остановлен нажатием кнопки «Стоп». Линейный контактор Л, потеряв питание, размыкает свой главный контакт $Л_1$ в цепи якоря двигателя. Последний останавливается. Далее выключателем Р снимается напряжение со всей схемы и она возвращается в исходное положение.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Техника построения естественной механической характеристики двигателя, как и все необходимые для этого соотношения, известны из предыдущего. Поэтому остановимся в основном на соотношениях, необходимых для расчета моментов времени выведения ступеней пускового сопротивления и на некоторых вспомогательных соотношениях.

При номинальном токе момент двигателя [2-1] в ньютон-метрах

$$M_н = 9550\frac{P}{n}, \tag{2.1}$$

где P — номинальная мощность двигателя, кВт;

n — число оборотов двигателя в минуту.

Момент двигателя при максимальном пусковом токе

$$M_{пуск.\,макс} = m_{макс}M_н; \tag{2.2}$$

при минимальном пусковом токе

$$M_{пуск.\,мин} = m_{мин}M_н, \tag{2.3}$$

где $m_{макс}$ и $m_{мин}$ — максимальная и минимальная кратности номинального тока.

Вращающий (динамический) момент при максимальном пусковом моменте и моменте сопротивления $M_с$, равном номинальному ($M_с = M_н$),

$$M_{дин.\,макс} = M_{пуск.\,макс} - M_с; \tag{2.4}$$

при минимальном пусковом моменте

$$M_{дин.\,мин} = M_{пуск.\,мин} - M_с. \tag{2.5}$$

Время разгона двигателя на каждой ступени можно определить [2-2] по формуле

$$t_n = \frac{J}{4{,}15}\cdot\frac{n_k - n_{k-1}}{M_{дин.\,макс} - M_{дин.\,мин}}\lg\frac{M_{дин.\,макс}}{M_{дин.\,мин}}, \tag{2.6}$$

где J — момент инерции системы механизм — двигатель, приведенный к валу двигателя, кг · м^2;

n_k — скорость вращения, до которой разгоняется двигатель на рассматриваемой ступени сопротивления, об/мин;

n_{k-1} — скорость вращения, до которой разгоняется двигатель на предыдущей ступени сопротивления, об/мин.

Пример. *Дано:* двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением мощностью $P = 10{,}3$ кВт; $U = 220$ В, $I_{я.н} = 56$ А, $n_н = 830$ об/мин запускается автоматически с ускорением в функции времени с помощью реле времени и контакторов при моменте сопротивления нагрузки $M_с = M_н$. Сопротивление якоря $R_я = 0{,}25$ Ом. Максимальный пусковой ток не должен превышать 2,5-кратного значения номинального тока. Момент инерции якоря электродвигателя вместе с моментом инерции механизма, приведенным к валу двигателя, равен $J = 3{,}75$ кг·м².

Требуется: 1. Определить число ступеней пускового сопротивления и их величину.

2. Определить время разгона двигателя на каждой ступени пускового сопротивления.

3. Составить схему автоматического пуска и останова двигателя, выбрать аппаратуру управления и определить ее уставки.

Решение. Скорость идеального холостого хода определяем по формуле

$$n_0 = n_н \cdot \frac{U}{U - I_{я.н}R_я} = 830 \cdot \frac{220}{220 - 56 \cdot 0{,}25} = 887 \text{ об/мин},$$

или в относительных единицах

$$n_{*0} = 1.$$

Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{я.н} = \frac{U}{I_я} = \frac{220}{56} = 3{,}93 \text{ Ом}.$$

Сопротивление якоря, отнесенное к номинальному сопротивлению двигателя,

$$R_{*я} = \frac{R_я}{R_{я.н}} = \frac{0{,}25}{3{,}93} = 0{,}064.$$

Номинальная скорость вращения двигателя в относительных единицах

$$n_{*н} = n_{*0} - R_{*я} = 1{,}0 - 0{,}064 = 0{,}936.$$

По координатам двух точек

$$n_{*0} = 1{,}0; \quad I_{*я} = 0$$

и

$$n_{*н} = 0{,}936; \quad I_{*я} = 1{,}0$$

строим естественную характеристику *HP* двигателя в виде продленной вправо вниз прямой *HB* (рис. 2-2).

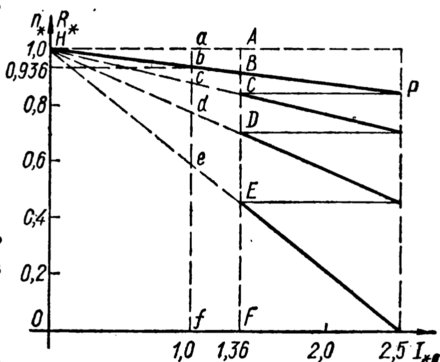


Рис. 2-2. Построение механических характеристик двигателя по данным примера расчета пуска с ускорением в функции времени.

Далее определяем число ступеней пускового сопротивления, варьируя допустимые из условий пуска значения пускового тока. Число ступеней получается равным трем. Минимальный пусковой ток, или ток переключения 1,36 $I_{*я} = 1{,}36$; максимальный допустимый ток 2,5 $I_{*я} = 2{,}5$.

Значения ступеней пускового сопротивления в относительных единицах получаем из графика при номинальном токе $I_{*я} = 1{,}0$:

$$R_{*1} = de = 0{,}184;$$

$$R_{*2} = cd = 0{,}099;$$

$$R_{*3} = bc = 0{,}054,$$

или в омах

$$R_1 = R_{*1} R_{я.\,н} = 0{,}184 \cdot 3{,}93 = 0{,}72;$$
$$R_2 = 0{,}099 \cdot 3{,}93 = 0{,}39;$$
$$R_3 = 0{,}054 \cdot 3{,}93 = 0{,}21.$$

Из графика определяем и скорости вращения, при которых происходит закорачивание (выведение) очередных ступеней пускового сопротивления:

$$n_{*1} = EF = 0{,}45; \quad n_{*2} = DF = 0{,}70; \quad n_{*3} = CF = 0{,}84,$$

или в оборотах в минуту

$$n_1 = n_{*1} n_0 = 0{,}45 \cdot 887 = 400;$$
$$n_2 = 0{,}70 \cdot 887 = 621;$$
$$n_3 = 0{,}84 \cdot 887 = 745.$$

Номинальный момент двигателя при номинальном токе определяем по формуле (2.1)

$$M_н = 9550 \cdot \frac{P}{n} = 9550 \cdot \frac{10{,}3}{830} = 118{,}5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент двигателя при 2,5-кратном номинальном токе находим по формуле (2.2):

$$M_{пуск.\,макс} = M_н \cdot 2{,}5 = 118{,}5 \cdot 2{,}5 = 296 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент двигателя при 1,36-кратном номинальном токе определяем по формуле (2.3)

$$M_{пуск.\,мин} = M_н \cdot 1{,}36 = 118{,}5 \cdot 1{,}36 = 161 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Динамический момент при максимальном пусковом моменте и моменте сопротивления $M_с$, равном номинальному, находим по формуле (2.4)

$$M_{дин.\,макс} = M_{пуск.\,макс} - M_с = 296 - 118{,}5 = 177{,}5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

при минимальном пусковом моменте

$$M_{дин.\,мин} = M_{пуск.\,мин} - M_с = 161 - 118{,}5 = 42{,}5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Время разгона двигателя на каждой ступени пускового сопротивления в общем виде определяем по формуле (2.6)

$$t_n = \frac{J}{4{,}15} \; \frac{n_k - n_{k-1}}{M_{дин.\,макс} - M_{дин.\,мин}} \lg \frac{M_{дин.\,макс}}{M_{дин.\,мин}},$$

где для первой ступени $n_k = 400$ об/мин, $n_{k-1} = 0$ об/мин;
для второй ступени $n_k = 621$ об/мин, $n_{k-1} = 400$ об/мин;
для третьей ступени $n_k = 745$ об/мин, $n_{k-1} = 621$ об/мин.

Подставляя соответствующие пределы изменения скорости вращения и значения динамических моментов, получаем время разгона двигателя:

на первой ступени

$$t_1 = \frac{3{,}75}{4{,}15} \cdot \frac{400 - 0}{177{,}5 - 42{,}5} \cdot \lg \frac{177{,}5}{42{,}5} = 2{,}68 \cdot \lg 4{,}18 = 2{,}68 \cdot 0{,}621 = 1{,}66 \text{ с};$$

на второй ступени

$$t_2 = \frac{3{,}75}{4{,}15} \cdot \frac{621 - 400}{177{,}5 - 42{,}5} \cdot \lg \frac{177{,}5}{42{,}5} = 1{,}48 \cdot \lg 4{,}18 = 1{,}48 \cdot 0{,}621 = 0{,}92 \text{ с};$$

на третьей ступени

$$t_3 = \frac{3{,}75}{4{,}15} \cdot \frac{745 - 621}{177{,}5 - 42{,}5} \cdot \lg \frac{177{,}5}{42{,}5} = 0{,}83 \cdot \lg 4{,}18 = 0{,}83 \cdot 0{,}621 = 0{,}51 \text{ с}.$$

В качестве принципиальной схемы автоматического пуска двигателя может быть принята схема, показанная на рис. 2-3. Схема мало отличается от рассмотренной ранее (рис. 2-1), она дополнена некоторой добавочной аппаратурой в соответствии с требованиями расчета. Здесь в цепях пуска и останова показаны контакты 1РКР и 2РКР реле контроля нормального режима, применяемые в случае полностью автоматизированного управления. Кроме того, в отличие от схемы рис. 2-1 здесь применены три реле ускорения и три контактора ускорения вместо двух, что обусловлено трехступенчатым ускорением пуска.

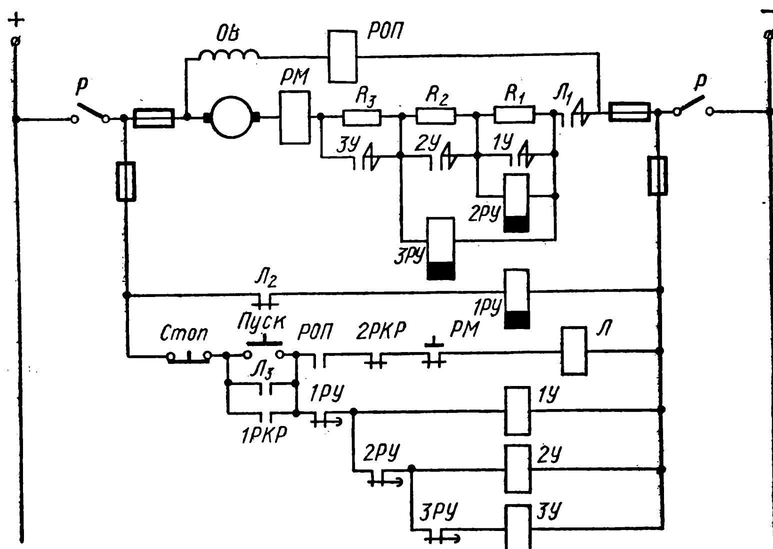


Рис. 2-3. Принципиальная схема автоматического пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с трехступенчатым ускорением в функции времени:

Р — выключатель; *Л* — линейный контактор; 1*У*, 2*У*, 3*У* — контакторы ускорения; R_1, R_2, R_3 — ступени пускорегулирующего сопротивления; 1*РУ*, 2*РУ*, 3*РУ* — реле ускорения, имеющие замедление при отпускании якоря; *РМ* — реле максимальной защиты (может быть встроено в линейный контактор *Л*); *РОП* — реле ослабления поля; 1*РКР*, 2*РКР* — контакты реле контроля нормального режима, служащие соответственно для автоматического пуска и останова двигателя при полностью автоматизированных процессах.

Защита от коротких замыканий осуществляется предохранителями. В цепи якоря двигателя поставлены мощные многоамперные предохранители, а в цепях управления — маломощные предохранители. Подключить цепи управления также на предохранители силовой цепи и этим упразднить предохранители маломощные нельзя, поскольку многоамперные предохранители силовой цепи могут не реагировать на маломощные короткие замыкания в цепях управления, и тогда последние останутся без защиты.

В цепи якоря поставлено реле РМ максимальной защиты от сверхтоков, которое при опасной перегрузке двигателя срабатывает и размыкает цепь линейного контактора Л. Последний обесточивается и

отключает якорь двигателя от источника напряжения. Кроме того, как и в схеме рис. 2-1, для предупреждения разноса двигателя при обрыве его цепи возбуждения в схеме рис. 2-3 предусмотрено реле ослабления поля РОП минимальной защиты, контролирующее наличие тока в обмотке возбуждения. При обрыве цепи возбуждения РОП срабатывает и размыкает цепь обмотки линейного контактора Л, который, потеряв питание, также отключает якорь двигателя от источника напряжения.

Выбираем основную аппаратуру управления (рис. 2-3).

Реле ускорения 1РУ, 2РУ, 3РУ. Все реле выбираем с замедлением при отпадании якоря. В качестве реле ускорения 1РУ, управляющего контактором ускорения 1У первой ступени ускорения, выбираем электромагнитное реле постоянного тока с демпферной гильзой типа РЭВ с одним замыкающим контактом, с выдержкой времени при отпадании якоря в пределах 1—3с. Выдержка времени грубо регулируется изменением толщины бронзовой прокладки на якоре, а точно — изменением затяжки пружины.

В качестве реле ускорения 2РУ, управляющего контактором ускорения 2У второй ступени ускорения, выбираем электромагнитное реле постоянного тока типа ЭРЭ-101/1 с одним замыкающим контактом, с выдержкой времени при закорачивании обмотки реле в пределах 0,25—1,0 с.

В качестве реле ускорения 3РУ, управляющего контактором ускорения 3У третьей ступени ускорения, выбираем реле типа РЭВ с одним замыкающим контактом, с выдержкой времени при закорачивании обмотки реле в пределах 0,25 — 0,9 с.

Контакторы ускорения 1У, 2У, 3У и линейный контактор Л. В качестве контаторов 1У, 2У, 3У могут быть приняты контакторы постоянного тока типа КП-2 серии КП-1002 с одним замыкающим контактом, с гашением дуги. Главные контакты контактора пригодны для работы в цепи напряжения до 220 В постоянного тока, номинальный ток 75 А. Предельный ток коммутирования контакторов не более трехкратного номинального. Собственное время включения 0,08 с, отключения — 0,04 с. [2-3].

В качестве линейного контактора Л также может быть принят контактор типа КП-2 серии КП-1002А с одним главным замыкающимся контактом, с гашением на длительно допустимый ток 75 А и с двумя блок-контактами, один из которых размыкающий, другой — замыкающий.

Выбираем уставки времени реле ускорения 1РУ, 2РУ, 3РУ. Поскольку собственное время включения каждого из контакторов 1У, 2У, 3У одинаково и равно $t_y = 0{,}08$ с, то при времени разгона двигателя на первой ступени $t_1 = 1{,}65$ с уставка реле 1РУ

$$t_{1РУ} = t_1 - t_y = 1{,}65 - 0{,}08 = 1{,}57 \text{ с.}$$

Аналогично уставки реле 2РУ и 3РУ получаются

$$t_{2РУ} = t_2 - t_y = 0{,}91 - 0{,}08 = 0{,}83 \text{ с};$$

$$t_{3РУ} = t_3 - t_y = 0{,}51 - 0{,}08 = 0{,}43 \text{ с.}$$

Как было указано выше, осуществить эти уставки можно путем грубого регулирования с помощью изменения толщины прокладки на якоре и точного регулирования — с помощью изменения натяжения пружины.

Глава третья

РАСЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В качестве приводов механизмов собственного расхода электрических станций и подстанций наиболее часто применяются асинхронные двигатели. Мощность этих двигателей колеблется от нескольких долей до нескольких сотен и датже тысяч киловатт, а напряжение — от 380 В до 3—6 кВ и выше.

Широкое распространение асинхронных двигателей обусловлено простотой их конструкции, высокими к.п.д. и надежностью в эксплуатации, отсутствием коллектора, а также меньшей массой и дешевизной по сравнению с двигателями постоянного тока. Поэтому для таких распространенных механизмов, как транспортеры, вентиляторы и насосы асинхронные двигатели применяются почти во всех случаях. Мостовые краны в большинстве случаев также оборудуются асинхронными двигателями. Лишь в приводах, требующих плавного регулирования скорости (питатели пыли и др.), асинхронные двигатели уступают двигателям постоянного тока, а в приводах мощных нерегулируемых установок, таких как компрессоры, насосы и пр.— уступают синхронным двигателям.

К недостаткам асинхронных двигателей относится квадратичная зависимость их вращающего момента от напряжения, в результате чего при снижении напряжения вращающий момент, а следовательно, и производительность приводимого движение механизма сильно уменьшаются.

ЗАВИСИМОСТЬ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ОТ СКОЛЬЖЕНИЯ

Как известно, скорость вращения магнитного потока статора асинхронного электродвигателя зависит от частоты сети и от числа полюсов статорной обмотки и определяется известным соотношением

$$n_c = \frac{60f}{p},$$

где n_c — скорость вращения магнитного потока, об/мин;
f — частота сети;
p — число пар полюсов статорной обмотки.

Номинальная скорость вращения ротора меньше скорости вращения поля статора (синхронной) вследствие наличия скольжения, определяемого по формуле

$$s_н = \frac{n_с - n_н}{n_с}, \qquad (3.1)$$

где $n_н$ — номинальная скорость вращения ротора, об/мин;

$s_н$ — номинальное скольжение.

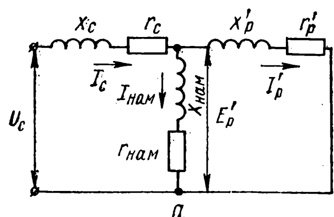
Номинальное скольжение для большого класса асинхронных двигателей, выпускаемых промышленностью, составляет 2—5%. Выпускаются также специальные двигатели с повышенным скольжением, достигающим 8—10%.

Основные соотношения между механическими и электрическими величинами в процессе пуска можно рассмотреть с помощью схемы замещения асинхронного электродвигателя при заторможенном роторе [3-1] (рис. 3-1, *а*). Все величины фазные и приведены к цепи статора двигателя т.е.

$$E'_р = kE_р;\ I'_р = \frac{I_р}{k};\ r'_р = k^2 r_р;\ x'_р = k^2 x_р,$$

где коэффициент

$$k = \frac{E_с}{E_{р.\,н}} = \frac{U_{с.\,н}}{E_{р.\,н}}.$$



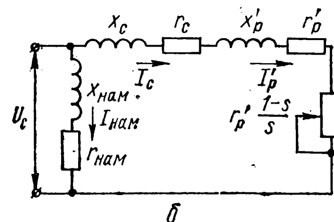


Рис. 3-1. Схема замещения асинхронного электродвигателя:

а — при заторможенном роторе; *б* — при вращающемся роторе.

При вращающемся роторе схема замещения (рис. 3-1, *б*) получена при допущении, что падением напряжения на сопротивлении обмотки статора от тока намагничивания можно пренебречь (цепь намагничивания условно перенесена на зажимы статора). Для этой схемы приведенный ток ротора

$$I'_р = \frac{U_с}{\sqrt{\left(r_с + r'_р + r'_р\frac{1-s}{s}\right)^2 + (x_с + x'_р)^2}}, \qquad (3.2)$$

где $U_с$ — фазное напряжение статора;

$r'_р$ — активное сопротивление фазы цепи ротора в заторможенном состоянии;

$r'_р\frac{1-s}{s}$ — активное сопротивление, имитирующее механическую нагрузку одной фазы;

$s = \frac{n_с - n_р}{n_с}$ — скольжение;

$n_р$ и $n_с$ — соответственно число оборотов ротора и его синхронное число оборотов.

Упростив знаменатель выражения (3.2)

$$r_c + r'_p + r'_p \frac{1-s}{s} = r_c + \frac{r'_p}{s},$$

получим выражение для приведенного тока в роторе в виде

$$I'_p = \frac{U_c}{\sqrt{\left(r_c + \frac{r'_p}{s}\right)^2 + (x_c + x'_p)^2}}. \qquad (3.3)$$

Из выражения (3.3) следует, что с изменением скольжения s ток в цепи ротора, а следовательно, и развиваемый вращающий момент изменяется. Характер этого изменения показан на рис. 3-2.

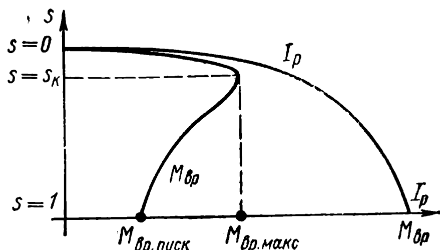


Рис. 3-2. Зависимость тока ротора и вращающего момента от скольжения.

В начальный момент пуска вращающий момент $M_{вр.\,пуск}$ двигателя определяется точкой на кривой момента, соответствующей скольжению $s = 1$. По мере разворота двигателя скольжение уменьшается и вращающий момент возрастает, и при некотором скольжении $s_к$, называемом критическим, достигает своего максимального значения $M_{вр.\,макс}$.

Критическое скольжение определяется по известной формуле

$$s_к = \frac{r'_p}{\sqrt{r_c^2 + (x_c + x'_p)^2}}, \qquad (3.4)$$

где x_c и x'_p — обычно определяются из опыта короткого замыкания, т. е. при неподвижном роторе.

Подставляя в уравнение (3.3) скольжение $s = 1$, получаем выражение для тока ротора в начальный момент пуска

$$I'_p = \frac{U_c}{\sqrt{(r_c + r'_p)^2 + (x_c + x'_p)^2}};$$

ток ротора при скольжении, равном критическому, может быть получен по тому же уравнению при $s = s_к$.

Ту часть передаваемой от статора к ротору активной мощности, которая идет на покрытие механической нагрузки на валу трехфазного двигателя, можно определить по схеме замещения (рис. 3-1, *б*):

$$P_в = 3I'^2_p \left(r'_p \frac{1-s}{s}\right); \qquad (3.5)$$

тогда вращающий момент в ньютон-метрах [3-3]

$$M_{вр} = \frac{P_в}{\omega}, \qquad (3.6)$$

где ω — угловая скорость вращения, рад/с;

$P_в$ — активная мощность, Вт.

Подставляя в формулу (3.6) значение активной мощности $P_в$ из (3.5) и выражая угловую скорость вращения ω через синхронную угловую скорость вращения ω_c по выражению $\omega = \omega_c(1 - s)$, получаем

$$M_{вр} = \frac{3I_р'^2 r_р' \frac{1-s}{s}}{\omega_c(1-s)} = \frac{3I_р'^2 r_р'}{\omega_c s}$$

и, подставляя далее значение тока $I_р'$ из формулы (3.3), определяем вращающий момент в общем виде:

$$M_{вр} = \frac{3U_c^2 r_р'}{\omega_c s\left[\left(r_c + \frac{r_р'}{s}\right)^2 + (x_c + x_р')^2\right]}. \quad (3.7)$$

При подстановке в выражение (3.7) скольжения $s = 1$ получаем уравнение для начального момента пуска

$$M_{вр.\,пуск} = \frac{3U_c^2 r_р'}{\omega_c[(r_c + r_р')^2 + (x_c + x_р')^2]}. \quad (3.8)$$

При подстановке в (3.7) критического скольжения по формуле (3.4) после несложного преобразования и сокращения получаем уравнение для максимального вращающего момента

$$M_{вр.\,макс} = \frac{3U_c^2}{2\omega_c\left[r_c + \sqrt{r_c^2 + (x_c + x_р')^2}\right]}. \quad (3.9)$$

Разделив уравнение (3.7) на (3.9), получим отношение моментов

$$\frac{M_{вр}}{M_{вр.\,макс}} = \frac{2r_р'\left[r_c + \sqrt{r_c^2 + (x_c + x_р')^2}\right]}{s\left[\left(r_c + \frac{r_р'}{s}\right)^2 + (x_c + x_р')^2\right]}.$$

Поскольку из уравнения (3.4) следует, что

$$\sqrt{r_c^2 + (x_c + x_р')^2} = \frac{r_р'}{s_к},$$

то после подстановки и упрощения находим

$$\frac{M_{вр}}{M_{вр.\,макс}} = \frac{2r_р'\left(r_c + \frac{r_р'}{s_к}\right)}{s\left[\left(\frac{r_р'}{s_к}\right)^2 + \left(\frac{r_р'}{s}\right)^2 + \frac{2r_c r_р'}{s}\right]}.$$

Разделив, наконец, числитель и знаменатель на $\frac{r''_р}{s_к}$, после сокращения получим рассматриваемое отношение моментов в виде

$$\frac{M_{вр}}{M_{вр.\ макс}} = \frac{2\left(\frac{r_c s_к}{r'_р} + 1\right)}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s} + \frac{2r_c s_к}{r'_р}}. \qquad (3.10)$$

Если для удобства практических расчетов пренебречь относительно небольшим активным сопротивлением обмотки статора, то отношение (3.10) принимает вид

$$\frac{M_{вр}}{M_{вр.\ макс}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s}}. \qquad (3.11)$$

Для расчета важное значение имеет отношение вращающего момента $M_{вр}$ к номинальному вращающему моменту $M_{вр.\ н}$. Для получения этого отношения обозначим сначала кратность максимального вращающего момента $M_{вр.\ макс}$ по отношению к номинальному $M_{вр.\ н}$ при номинальном напряжении через $m_м$, т. е.

$$m_м = \frac{M_{вр.\ макс}}{M_{вр.\ н}},$$

откуда

$$M_{вр.\ н} = \frac{M_{вр.\ макс}}{m_м}.$$

Тогда, учитывая выражение (3.10), получим кратность вращающего момента по отношению к номинальному в виде

$$m = \frac{M_{вр}}{M_{вр.\ н}} = \frac{M_{вр} m_м}{M_{вр.\ макс}} = m_м \frac{2\left(\frac{r_c s_к}{r'_р} + 1\right)}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s} + \frac{2r_c s_к}{r'_р}}. \qquad (3.12)$$

Упрощенное значение этой кратности получим с учетом (3.11) в виде

$$m = m_м \frac{2}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s}}. \qquad (3.13)$$

Формула (3.12) представляет зависимость вращающего момента от скольжения $m = f(s)$ и известна в литературе как формула Клосса.

Кратность максимального вращающего момента номинальному можно рассматривать как кратность максимальной мощности $P_{в.\ макс}$ мощности $P_{в.\ н}$, покрывающей соответствующие механические нагрузки

на валу двигателя. Тогда с учетом значения максимального вращающего момента по выражению (3.9), а также с учетом того, что по (3.6)

$$P_{в.\,макс} = \omega_c M_{вр.\,макс},$$

получим

$$m_м = \frac{M_{вр.\,макс}}{M_{вр.\,н}} = \frac{P_{в.\,макс}}{P_{в.\,н}} = \frac{3U_c^2}{P_{в.\,н} - 2\left[r_c + \sqrt{r_c^2 + (x_c + x'_р)^2}\right]},$$

где $P_{в.\,макс}$ — мощность, развивающая максимальный вращающий момент;

$P_{в.\,н}$ — мощность, развивающая вращающий момент при номинальной нагрузке двигателя.

Подставляя значение $P_{в.\,н}$, равное

$$P_{в.\,н} = \frac{P_н + \Delta P_{мех}}{1 - s_н}, \tag{3.14}$$

получаем

$$m_м = \frac{3U_c^2(1 - s_н)}{2(P_н + \Delta P_{мех})\left[r_c + \sqrt{r_c^2 + (x_c + x'_р)^2}\right]}, \tag{3.15}$$

где U_c — фазное напряжение на зажимах статора двигателя;

$P_н$ — номинальная мощность двигателя;

$\Delta P_{мех}$ — механические потери мощности на трение и вентиляционные потери;

$s_н$ — скольжение при номинальной нагрузке асинхронного двигателя (в случае асинхронного пуска синхронного компенсатора принимают $s_н \approx 0{,}03$, что соответствует примерно моменту подачи возбуждения).

Для получения критического скольжения $s_к$ и соответствующей ему кратности максимального вращающего момента $m_м$, определяемых соответственно выражениями (3.4) и (3.15), необходимо знать активное r_c и реактивное x_c сопротивления статора и приведенные к цепи статора активное $r'_р$ и реактивное $x'_р$ сопротивления ротора. Для получения значений этих сопротивлений можно произвести с асинхронным двигателем (как и с синхронным двигателем и компенсатором) опыт короткого замыкания [3-1]. Опыт производится при неподвижном роторе ($s = 1$) и пониженном напряжении статора. При питании обмотки статора трехфазным током измеряется линейный ток короткого замыкания $I_к$, потребляемая из сети активная мощность $P_к$ (по схеме двух ваттметров) и линейное напряжение короткого замыкания $U_к$. По данным опыта определяются следующие величины.

Полное сопротивление короткого замыкания двигателя, т. е. полное сопротивление статора и полное приведенное сопротивление ротора в омах

$$z_к = \frac{U_к}{\sqrt{3} I_к}. \tag{3.16}$$

Активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора

$$r_к = r_с + r'_р = \frac{P_к}{3I_к^2}. \qquad (3.17)$$

Активное сопротивление статора очень мало и им можно задаться, принимая $r_с \approx 0{,}04 \div 0{,}05$ Ом. Приближенное его значение можно также определить по данным литературы [3-1]. Приведенное активное сопротивление ротора

$$r'_р = r_к - r_с. \qquad (3.18)$$

Индуктивное сопротивление статора и приведенное индуктивное сопротивление ротора

$$x_с + x'_р = x_к = \sqrt{z_к^2 - (r_с + r'_р)^2}. \qquad (3.19)$$

Сопротивления асинхронных двигателей можно определить и по каталожным данным, о чем будет сказано ниже.

Зная сопротивления двигателей, можно по уравнению (3.4) определить критическое скольжение $s_к$.

ВРЕМЯ РАЗВОРОТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Время разворота асинхронных двигателей (и синхронных компенсаторов с асинхронным пуском) от положения покоя до нормальной (или соответственно синхронной) скорости вращения можно получить исходя из основного уравнения движения

$$M_{вр} - M_с = M_{изб}, \qquad (3.20)$$

где $M_{вр}$ — вращающий момент двигателя, Н · м;

$M_с$ — момент сопротивления приводимого в движение механизма, Н · м;

$M_{изб}$ — избыточный или динамический момент, Н · м.

Избыточный момент определяется по формуле

$$M_{изб} = J\frac{d\omega}{dt}, \qquad (3.21)$$

где J — момент инерции ротора двигателя и вращаемых им механизмов относительно оси вращения, кг · м²;

ω — угловая скорость вращения, рад/с;

$\frac{d\omega}{dt}$ — угловое ускорение, рад/с².

Момент инерции

$$J = J_{дв} + J_{мех.\,прив}, \qquad (3.22)$$

где $J_{дв}$ — момент инерции ротора двигателя, кг · м²;

$J_{мех.прив}$ — момент инерции механизма, приведенный к номинальной скорости вращения двигателя по формуле

$$J_{мех.прив} = J_{мех} \frac{n^2_{мех.н}}{n^2_н};$$

$J_{мех}$ — момент инерции механизма, кг · м²;
$n_н$ — номинальная скорость вращения механизма, об/мин.

Для получения уравнения, определяющего время разворота двигателя или синхронного компенсатора, удобнее величины $M_{изб}$ и ω в уравнении (3.21) выразить в относительных единицах, т.е.

$$m_{изб} = \frac{M_{изб}}{M_{изб.н}} = \frac{M_{изб}}{M_{вр.н}} \qquad (3.23)$$

и

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_c}, \qquad (3.24)$$

где $M_{изб.н} = M_{вр.н}$ — номинальный избыточный момент, равный номинальному вращающему моменту электродвигателя;

$$\omega_c = \frac{2\pi n_c}{60}$$ — синхронная угловая скорость вращения.

Подставляя в выражение (3.23) значение $M_{изб}$ из формулы (3.21), получаем

$$m_{изб} = \frac{M_{изб}}{M_{вр.н}} = \frac{1}{M_{вр.н}} J \frac{d\omega}{dt},$$

и поскольку

$$\omega = \omega_c \omega_* = \frac{2\pi n_c}{60} \omega_*,$$

то

$$m_{изб} = \frac{1}{M_{вр.н}} J \frac{2\pi n_c}{60} \cdot \frac{d\omega_*}{dt},$$

или

$$m_{изб} = 0{,}105 J \frac{n_c}{M_{вр.н}} \cdot \frac{d\omega^*}{dt}, \qquad (3.25)$$

где n_c — синхронное число оборотов в минуту.

Номинальный вращающий момент с учетом уравнений (3.6) — (3.14) можно представить в виде

$$M_{вр.н} = \frac{P_{в.н}}{\omega_c} = \frac{P_н + \Delta P_{мех}}{\omega_c (1 - s_н)},$$

или, пренебрегая малыми значениями $\Delta P_{мех}$ и $s_н$, получаем

$$M_{вр.н} = \frac{P_н}{\omega_c} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P_н}{n_c} = 9{,}55 \frac{P_н}{n_c}.$$

Тогда, подставляя это значение момента в уравнение (3.25), получаем более удобное для практических расчетов уравнение избыточного момента, т.е.

$$m_{\text{изб}} = 0{,}105J \frac{n_{\text{с}}^2}{9{,}55P_{\text{н}}} \cdot \frac{d\omega_*}{dt},$$

или

$$m_{\text{изб}} = 0{,}011J \frac{n_{\text{с}}^2}{P_{\text{н}}} \cdot \frac{d\omega_*}{dt}. \tag{3.26}$$

Решая это уравнение относительно времени t, можно получить время разворота двигателя в секундах, соответствующее изменению скорости вращения от ω_{1*} до ω_{2*} в виде

$$t = 0{,}011J \frac{n_{\text{с}}^2}{P_{\text{н}}} \int\limits_{\omega_{1*}}^{\omega_{2*}} \frac{d\omega_*}{m_{\text{изб}}} = T_j \int\limits_{\omega_{1*}}^{\omega_{2*}} \frac{d\omega_*}{m_{\text{изб}}}, \tag{3.27}$$

откуда видно, что время разворота двигателя или компенсатора при $m_{\text{изб}} = 1$ определяется величиной T_j. Эта величина носит название механической постоянной времени и представляет собой время разворота электродвигателя в секундах при внезапном приложении к ротору избыточного момента, равного номинальному вращающему моменту.

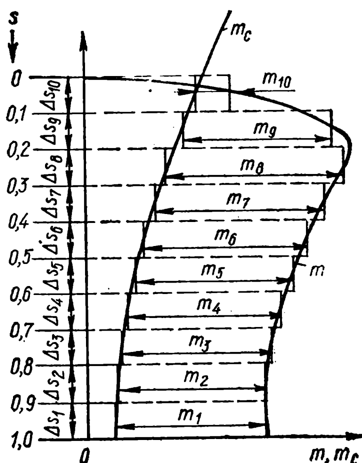


Рис. 3-3. Графическое решение уравнения (3.28).

Учитывая, что по мере увеличения скорости вращения скольжение s уменьшается, уравнение (3.27) можно представить также в виде

$$t = -0{,}011J \frac{n_{\text{с}}^2}{P_{\text{н}}} \int\limits_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m_{\text{изб}}} = -T_j \int\limits_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m_{\text{изб}}}, \tag{3.28}$$

где, как и выше, J выражено в кг · м² и $P_{\text{н}}$ — в Вт (или J — в т · м² и $P_{\text{н}}$ — в кВт).

В процессе пуска избыточный момент в общем случае изменяется по сложному закону, поэтому решение уравнения (3.28) аналитическим путем либо затруднительно, либо даже невозможно. Решение этого уравнения найдем графоаналитическим путем. Для этого координату s в пределах 0—1 разбиваем, например, на 10 равных частей (рис. 3-3) и для каждого из этих отрезков находим среднее значение избыточного момента

$$m_{\text{изб}} = \frac{M_{\text{изб}}}{M_{\text{вр. н}}} = \frac{M_{\text{вр}}}{M_{\text{вр. н}}} - \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{вр. н}}} = m - m_{\text{с}}, \tag{3.29}$$

где m и $m_с$ — соответственно относительные значения вращающего момента и момента сопротивления.

Средние значения избыточного момента для каждого из отрезков скольжения Δs показаны на рис. 3-3 в виде отрезков m_1, m_2, ... , m_{10}. Тогда приближенное значение интеграла, входящего в выражение (3.28), в пределах рассматриваемого изменения от s_1 до s_2 будет

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m_{изб}} = \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m - m_с} \approx -\left[\frac{\Delta s_1}{m_1} + \frac{\Delta s_2}{m_2} + \cdots + \frac{\Delta s_n}{m_n}\right] = -\Delta s \sum_1^n \frac{1}{m}. \quad (3.30)$$

Определив далее механическую постоянную времени по выражению

$$T_j = 0{,}011 J \frac{n_с^2}{P_н}, \quad (3.31)$$

искомое время t разворота машины получим по уравнению (3.28), т.е. как произведение значения механической постоянной времени (3.31) на значение интеграла (3.30).

При включении машины на пониженное напряжение, т.е. при пуске через сопротивление в цепи статора (реактор, активное сопротивление), время разворота изменится пропорционально квадрату отношения напряжения U на шинах к сниженному напряжению на зажимах машины. Например, в случае асинхронного пуска синхронного компенсатора через реактор время его разворота можно определить по уравнению

$$t_{пус\,к} = t \frac{U^2}{U_{с.\,к}^2}, \quad (3.32)$$

где $U_{с.\,к}$ — напряжение на зажимах синхронного компенсатора.

На электростанциях и подстанциях применяются асинхронные двигатели как с фазным ротором, так и короткозамкнутые. Рассмотрим особенности их автоматического пуска.

ДВИГАТЕЛИ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Естественные характеристики $m = f(s)$, $I_{*р} = f(s)$ и $I_{*с} = f(s)$ асинхронного двигателя с фазным ротором представлены в общем виде на рис. 3-4.

При синхронной скорости вращения ($n_* = 1$) э.д.с. в роторе не наводится и, следовательно, ток в роторе и момент на валу равны нулю. При снижении скорости вращения двигателя его момент m быстро нарастает и достигает своего максимального (критического) значения, а затем круто падает. Токи ротора $I_{*р}$ и статора $I_{*с}$ при снижении скорости вращения, начиная от синхронной, также быстро нарастают, и их кривые совпадают с кривой момента до критического скольжения $s_к$. Затем скорость нарастания токов снижается, и их кривые расходятся с опережающим нарастанием тока ротора.

Расчеты показывают, что при пуске двигателя по естественной механической характеристике, т.е. с закороченными кольцами, пуско-

вой вращающий момент $m_{пуск}$ получается (0,5 — 1,5) -кратным от номинального, т.е. небольшим, тогда как токи ротора и статора могут достигать (5 — 10)-кратных значений от номинальных, т.е. чрезмерно больших.

Большая величина пускового тока объясняется малым значением активного сопротивления фаз закороченного ротора при значительной э.д.с., наводимой в неподвижном роторе потоком статора.

Малая же величина пускового момента объясняется низким коэффициентом мощности ротора ($\cos \varphi_р$) вследствие превалирующего индуктивного сопротивления обмотки ротора.

Большие пусковые токи могут вызывать недопустимые динамические усилия в обмотках ротора и статора и их перегрев, а низкий пусковой момент может оказаться недостаточным для разворота приводимого в движение механизма под нагрузкой. Отсюда возникает необходимость в применении различных средств и способов для уменьшения пусковых токов и одновременного увеличения пускового момента асинхронного двигателя с фазным ротором. Это достигается применением внешних пусковых сопротивлений в цепи ротора, о которых подробнее будет сказано ниже, после рассмотрения вопросов расчета и построения естественной и искусственных механических характеристик.

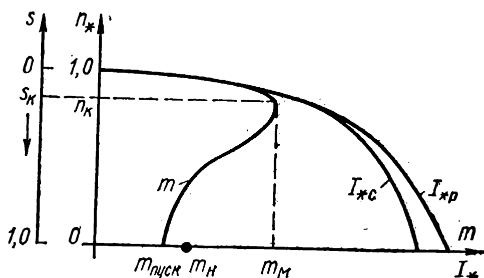


Рис. 3-4. Естественные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Первый способ. В наиболее общем случае можно воспользоваться точной формулой (3.10), которую удобно представить в виде

$$\frac{M_{вр}}{M_{вр.\,макс}} = \frac{2(1 + as_к)}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s} + 2as_к}, \tag{3.33}$$

где

$$a = \frac{r_с}{r'_р}.$$

Выражение (3.4) для критического скольжения при этом запишется в виде формулы

$$s_к = \frac{r_с}{a\sqrt{r_с^2 + (x_с + x'_р)^2}}. \tag{3.34}$$

Критическое скольжение $s_к$ может быть также вычислено из выражения (3.33), которое для номинальных параметров $M_{вр.н}$ и $s_н$ запишется [3-2] в виде

$$\frac{M_{вр.\,макс}}{M_{вр.\,н}} = \frac{\frac{s_н}{s_к} + \frac{s_к}{s_н} + 2as_к}{2(1 + as_к)}.$$

Решение полученного выражения относительно $s_к$ дает

$$s_к = \frac{s_н\left(m_м \pm \sqrt{m_м^2 - B}\right)}{B}, \tag{3.35}$$

где

$$B = 1 - 2as_н(m_м - 1). \tag{3.36}$$

В выражении (3.35) перед корнем следует принимать знак плюс, поскольку знак минус отвечает случаю нахождения точки нормального режима в зоне скольжений $s_н > s_к$, т. е. на нерабочем участке характеристики.

Подставляя значение $s_к$ из (3.34) или (3.55) в (3.33), получаем точную расчетную формулу для естественной механической характеристики.

Второй способ. Для асинхронных двигателей с фазным ротором, имеющих нормальное скольжение, обычно величина

$$a = \frac{r_с}{r'_р} \approx 1;$$

при этом величина B принимает значение

$$B = 1 - 2s_н(m_м - 1). \tag{3.37}$$

Тогда, определяя $s_к$ по (3.35) с учетом (3.37), можно по (3.33) рассчитать и построить естественную механическую характеристику при помощи лишь двух известных паспортных величин: $m_м$ и $s_н$.

Третий способ. Для асинхронных двигателей с фазным ротором большой мощности, у которых можно пренебрегать относительно небольшим активным сопротивлением обмотки статора ($r_с \approx 0$), расчет характеристики по (3.33) еще больше упрощается.

В этом случае получаем значения

$$a = \frac{r_с}{r'_р} = 0; \quad B = 1; \quad s_к = s_н\left(m_м + \sqrt{m_м^2 - 1}\right),$$

и расчетное уравнение для естественной механической характеристики (3.33) принимает вид уравнения (3.11), т. е.

$$\frac{M_{вр}}{M_{вр.\,макс}} = \frac{2}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s}}.$$

Четвертый способ. Если значения величин $M_{\text{вр. макс}}$ и $s_к$ неизвестны, но можно ограничиться приближенным расчетом, то естественную механическую характеристику можно принять в виде прямой линии, проходящей через две точки с координатами $M_{вр} = 0$; $s = 0$ и $M_{вр} = M_{\text{вр. н.}}$; $s = s_н$. Расчетная формула для естественной характеристики в этом случае будет представлять собой уравнение прямой

$$M_{вр} = \frac{M_{\text{вр. н}}}{s_н} \cdot s. \tag{3.38}$$

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Первый способ. Здесь также в общем случае можно воспользоваться точной формулой (3.33), помня, однако, что теперь вместо сопротивления ротора $r_р$ необходимо подставлять сумму сопротивлений в цепи ротора

$$r_р + r_в = R_р,$$

где $r_в$ — добавочное внешнее сопротивление в цепи ротора (рис. 3-5).

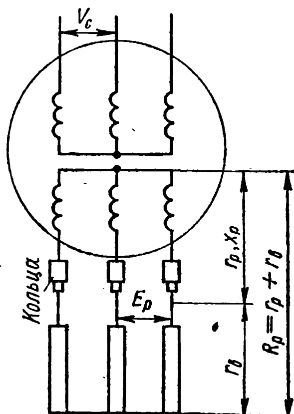


Рис. 3-5. Включение добавочных внешних сопротивлений $r_в$ в цепи ротора.

Величины $M_{\text{вр. макс}}$ и a в уравнении (3.33) при этом останутся прежними, поскольку они от внешнего сопротивления $r_в$ не зависят. Что же касается величины критического скольжения $s_к$, то она зависит от этого сопротивления. Если для естественной характеристики по (3.4) критическое скольжение

$$s_{к.\,е} = \frac{r'_р}{\sqrt{r_с^2 + (x_с + x'_р)^2}},$$

то для искусственной характеристики критическое скольжение будет

$$s_{к.\,и} = \frac{R'_р}{\sqrt{r_с^2 + (x_с + x'_р)^2}}.$$

Разделив второе выражение на первое, получим

$$\frac{s_{к.\,и}}{s_{к.\,е}} = \frac{R'_р}{r'_р} = \frac{R_р}{r_р},$$

откуда

$$s_{к.\,и} = s_{к.\,е}\frac{R_р}{r_р}, \tag{3.39}$$

т. е. критическое скольжение на искусственной характеристике во столько раз больше, чем на естественной, во сколько полное сопротивление в цепи ротора $R_р$ больше внутреннего сопротивления ротора $r_р$.

Подставляя в формулу (3.33) найденное по (3.39) значение критического скольжения, легко рассчитать и построить соответствующие искусственные механические характеристики при любых значениях сопротивления $R_р$ роторной цепи.

Второй способ. Если естественная механическая характеристика построена, то можно еще проще построить искусственную характеристику для любого заданного внешнего сопротивления, не прибегая к расчетам по формулам. Для этого можно воспользоваться легко выводимым [3-5] соотношением скольжений для искусственной и естественной характеристик при любых одинаковых вращающих моментах, т.е. соотношением

$$\frac{s_и}{s_е} = \frac{R_р}{r_р}, \qquad (3.40)$$

или

$$s_и = s_е \frac{R_р}{r_р}.$$

При данном значении вращающего момента берем значение скольжения $s_е$ на естественной характеристике и умножаем на отношение сопротивлений $\frac{R_р}{r_р}$, получая при этом значение скольжения $s_и$ на искомой искусственной характеристике. Таким же путем находят значение скольжения на искусственной характеристике при других значениях вращающего момента.

Заметим, что выражение (3.39) является частным случаем выражения (3.40), поскольку критическим скольжениям $s_{к.\,и.}$ и $s_{к.\,е.}$ также соответствует один и тот же вращающий момент, равный критическому.

Третий способ. Это приближенный способ построения искусственных механических характеристик, основанный на использовании упрощенного уравнения (3.11) и уравнения (3.4) при подстановке в них вместо внутреннего сопротивления ротора $r_р$ суммы сопротивлений $r_р + r_в = R_р$ и допущении, что $r_с = 0$. В этом случае по (3.4) получаем

$$s_к = \frac{R'_р}{x_с + x'_р}. \qquad (3.41)$$

По (3.11), пренебрегая в рабочей части характеристики дробью $\frac{s}{s_к}$ по сравнению с дробью $\frac{s_к}{s}$, и с учетом (3.41) найдем

$$M_{вр} = 2M_{вр.\,макс}\frac{x_с + x'_р}{R'_р} \cdot s.$$

Учитывая далее, что $R'_р$ отличается от $R_р$ лишь постоянным коэф-

фициентом, а также объединяя и обозначая через C все постоянные величины, получим это уравнение в виде уравнения прямой

$$M_{вр} = \frac{C}{R_р} \cdot s = \frac{C}{r_р + r_в} \cdot s. \tag{3.42}$$

Из (3.42) следует, что искусственные механические характеристики двигателя с фазным ротором для любых значений внешнего сопротивления $r_в$ при указанных выше допущениях оказываются прямолинейными и все пересекаются в точке с координатами $M_{вр} = 0$; $s = 0$. Кривые эти наклонены тем больше, чем больше значение внешнего сопротивления $r_в$.

Практически для построения прямолинейных искусственных механических характеристик (3.42) используют зависимость между скольжением s и сопротивлением в цепи ротора при постоянном вращающем моменте, например номинальном.

Можно показать [3-3], что при номинальном вращающем моменте асинхронного двигателя с фазным ротором скольжение s равно относительному полному сопротивлению цепи ротора, т. е.

$$s = R_{*р}, \tag{3.43}$$

а при закороченных кольцах номинальное скольжение равно относительному внутреннему активному сопротивлению ротора, т. е.

$$s_н = r_{*р}. \tag{3.44}$$

С помощью выражения (3.43) можно построить искусственную механическую характеристику для любого заданного внешнего сопротивления $r_в$, проведя прямую из точки $m = 0$, $s = 0$, соответствующей синхронной скорости вращения, через точку с координатами $m = 1$, $s = R_{*р} = \frac{r_р + r_в}{R_{р.н}}$,

где $R_{р.н}$ — номинальное сопротивление ротора, определяемое по каталожным данным (3.48).

Рассмотренный способ построения искусственных механических характеристик для двигателей с фазным ротором оказывается сходным с построением характеристик для двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением.

РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Искусственные механические характеристики в их рабочей части могут быть приняты с известным приближением линейными. Поэтому расчет пусковых сопротивлений для двигателя с фазным ротором производится в основном аналогично тому, как это делается для двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением. При этом расчет может быть выполнен либо точным, либо приближенным способом.

Точный расчет пусковых сопротивлений основан на использовании естественной механической характеристики (рис. 3-6, *а*). Для этого задаются пиковым $M_{вр.1}$ и переключающим $M_{вр.2}$ вращающими моментами и через полученные на характеристике точки *a* и *b* проводят прямую *ab* до пересечения с линией синхронной скорости ($s = 0$) в точке *t*. Далее, из точки *t* проводят лучи *tc*, *td* и *te* с соблюдением равенства пиковых и переключающих вращающих моментов на всех ступенях переключения. Если равенство этих моментов не соблюдается, то, изменив значения моментов, строят лучи заново.

Соотношение (3.40) можно представить в виде формулы

$$R_р = r_р \frac{s_и}{s_е},$$

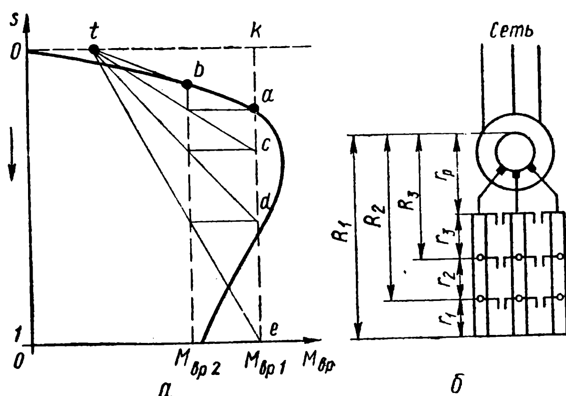


Рис. 3-6. Точный способ расчета пусковых сопротивлений двигателей с фазным ротором.

с учетом которой удобно определить полные активные сопротивления в цепи ротора (рис. 3-6, *б*):

$$\left.\begin{aligned} R_3 &= r_р \frac{kc}{ka}; \\ R_2 &= r_р \frac{kd}{ka}; \\ R_1 &= r_р \frac{ke}{ka}. \end{aligned}\right\} \quad (3.45)$$

Внутреннее сопротивление фазы обмотки ротора $r_р$ можно определить по каталожным данным из выражения

$$r_р = \frac{E_{р.\,н}}{\sqrt{3} I_{р.\,н}} \cdot s_н = R_{р.\,н} s_н, \quad (3.46)$$

Ступени пускового сопротивления при соединении в звезду будут:

$$\left.\begin{aligned} r_3 &= r_р \frac{ac}{ka}; \\ r_2 &= r_р \frac{cd}{ka}; \\ r_1 &= r_р \frac{de}{ka}. \end{aligned}\right\} \quad (3.47)$$

Приближенный расчет пусковых сопротивлений основан на использовании упрощенной естественной механической характеристики (рис. 3-7) в виде прямой линии.

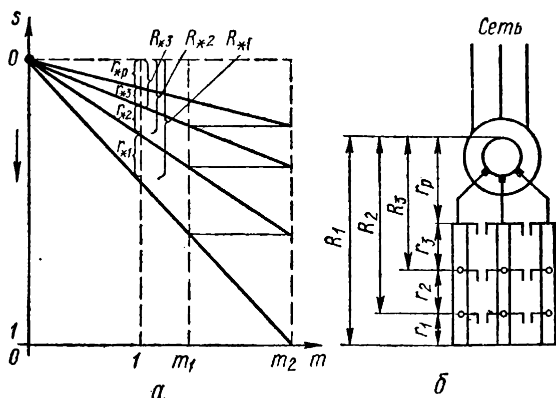


Рис. 3-7. Приближенный способ расчета пусковых сопротивлений двигателей с фазным ротором.

При этом также задаются пиковым и переключающим моментами и для них строятся искусственные (пусковые) механические характеристики в виде наклонных прямых, пересекающихся в точке с координатами $s = 0$, $m = 0$.

Далее при номинальном вращающем моменте $m = 1$ отсчитывают скольжения между смежными характеристиками и в случае соединения сопротивлений в звезду получают относительные сопротивления ступеней r_{*1}, r_{*2}, r_{*3}. Умножая эти сопротивления на номинальное сопротивление $R_{р.н}$, получим абсолютные значения ступеней в омах:

$$\left.\begin{aligned} r_3 &= r_{*3} \cdot R_{р.н}; \\ r_2 &= r_{*2} \cdot R_{р.н}; \\ r_1 &= r_{*1} \cdot R_{р.н}, \end{aligned}\right\} \quad (3.48)$$

где $R_{р.н} = \frac{E_{р.н}}{\sqrt{3} I_{р.н}}$.

Если при номинальном вращающем моменте ($m = 1$) отсчитывать для искусственных характеристик полные скольжения, то при этом будут получены соответствующие относительные полные сопротивления в цепи ротора R_{*3}, R_{*2}, R_{*1}.

СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Примерная схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором и активным внешним сопротивлением в цепи ротора представлена на рис. 3-8. Схема выполнена с ускорением в функции тока, для чего в роторную цепь включены обмотки токовых реле ускорения 1РУ, 2РУ, 3РУ.

П у с к д в и г а т е л я. Как при ручном пуске путем нажатия кнопки «Пуск», так и при автоматическом пуске путем замыкания контак-

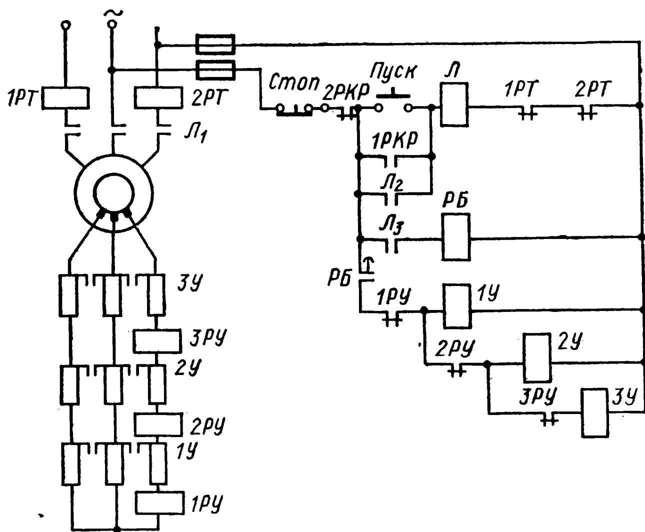


Рис. 3-8. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором.

тов реле контроля режима 1РКР срабатывает линейный контактор Л и своими главными контактами $Л_1$ подключает двигатель к сети при полном пусковом сопротивлении в цепи ротора, а блок-контактами $Л_2$ и $Л_3$ шунтирует кнопку «Пуск» и подает питание на блокирующее реле РБ с выдержкой времени на замыкание контактов. При подключении двигателя к сети срабатывают токовые реле ускорения 1РУ, 2РУ, и 3РУ и размыкают свои нормально замкнутые контакты в цепях контакторов ускорения 1У, 2У и 3У. По истечении выдержки времени срабатывает реле РБ и подготавливает цепи питания обмоток контакторов ускорения 1У, 2У и 3У.

После снижения пускового тока в роторной цепи до величины тока возврата (отпуска) реле ускорения 1РУ последнее отпадает и замыкает свой контакт в цепи контактора ускорения 1У, который срабатывает и закорачивает своими контактами первую ступень сопротивления в роторной цепи двигателя. Ток двигателя скачком возрастает, затем снова снижается. При достаточном снижении пускового тока

будут поочередно работать на возврате реле ускорения 2РУ и 3РУ и приведут в действие контакторы ускорения 2У и 3У, которые закоротят последовательно вторую и третью ступени пускового сопротивления и в конечном счете выведут двигатель на естественную механическую характеристику.

Выдержка времени реле блокировки РБ выбирается несколько больше времени размыкания контактов реле ускорения 1РУ, чем предотвращается срабатывание контактора ускорения 1У в начальный момент пуска.

Ток возврата (отпадания) реле ускорения 1РУ, 2РУ и 3РУ выбирается из условия

$$I_{\text{в. р. 1РУ}} > I_{\text{в. р. 2РУ}} > I_{\text{в. р. 3РУ}}.$$

Останов двигателя. Двигатель может быть остановлен как от руки (нажатием кнопки «Стоп»), так и автоматически после срабатывания реле максимальной защиты от коротких замыканий 1РТ, 2РТ, а также при срабатывании реле технологического контроля режима 2РКР, контакты которого также разрывают цепь питания обмотки линейного контактора Л.

Цепи управления защищаются предохранителями.

Пример 1. *Дано:* асинхронный двигатель с фазным ротором типа МТВ412-6 мощностью $P_{\text{н}} = 30$ кВт, $U_{\text{с. н}} = 380$ В, $n_{\text{н}} = 970$ об/мин ($n_{\text{с}} = 1000$ об/мин), $m_{\text{м}} = 2{,}8$, $E_{\text{р. н}} = 259$ В, $I_{\text{р. н}} = 72$ А, $r_{\text{с}} = 0{,}125$ Ом.

Требуется: 1. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику.

2. Рассчитать пусковое внешнее сопротивление $r_{\text{в}}$ в цепи ротора.

3. Выбрать схему управления и основную аппаратуру.

Решение. 1. По (3.1) номинальное скольжение

$$s_{\text{н}} = \frac{n_{\text{с}} - n_{\text{н}}}{n_{\text{с}}} = \frac{1000 - 970}{1000} = 0{,}03.$$

Поскольку двигатель имеет нормальное скольжение, принимаем в выражении (3.36) величину $a = 1$ и тогда по (3.37) получим

$$B = 1 - 2s_{\text{н}}(m_{\text{м}} - 1) = 1 - 2 \cdot 0{,}03\,(2{,}8 - 1) = 0{,}892.$$

Тогда критическое скольжение по (3.35) будет

$$s_{\text{к}} = \frac{s_{\text{н}}\left(m_{\text{м}} \pm \sqrt{m_{\text{м}}^2 - B}\right)}{B} = \frac{0{,}03\,(2{,}8 \pm \sqrt{2{,}8^2 - 0{,}892})}{0{,}892} = 0{,}183.$$

Зависимость вращающего момента от скольжения получим по выражению (3.33), которое при $a = 1$ принимает вид

$$m = m_{\text{м}} \frac{2(1 + s_{\text{к}})}{\dfrac{s}{s_{\text{к}}} + \dfrac{s_{\text{к}}}{s} + 2s_{\text{к}}}.$$

Тогда после подстановки значений $m_{\text{м}}$ и $s_{\text{к}}$ найдем

$$m = 2{,}8 \frac{2(1 + 0{,}183)}{\dfrac{s}{0{,}183} + \dfrac{0{,}183}{s} + 2 \cdot 0{,}183},$$

или

$$m = \frac{6{,}625}{\frac{s}{0{,}183} + \frac{0{,}183}{s} + 0{,}366}.$$

Подставляя значения скольжения от $s = 0$ до $s = 1$, получим соответствующие значения вращающего момента:

s	1	0,7	0,5	0,4	0,3	0,183	0,1	0,075	0,05	0,03	0
m	1,12	1,48	1,91	2,22	2,69	2,8	2,42	2,06	1,52	1,0	0

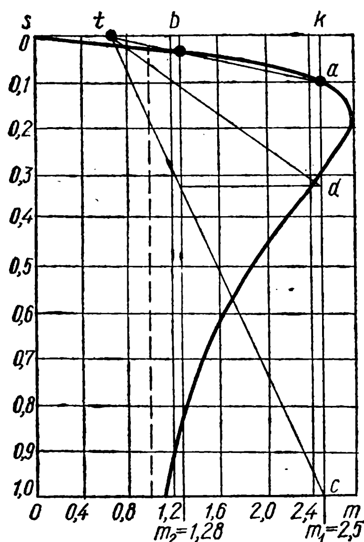


Рис. 3-9. Построение естественной механической характеристики (к примеру 1).

По этим данным строим естественную механическую характеристику $m = f(s)$ (рис. 3-9). Пусковой вращающий момент составляет 112% номинального.

2. Задаемся значениями пикового ($m_1 = 2{,}5$) и переключающего ($m_2 = 1{,}28$) моментов и через полученные на характеристике точки a и b проводим прямую ab до пересечения с линией синхронной скорости в точке t. Из этой точки проводим лучи tc и td при сохранении равенства пиковых и переключающих моментов. При этом число ступеней пускового сопротивления оказалось равным двум (рис. 3-9 и рис. 3-10).

По (3.45) определяем полные активные сопротивления (рис. 3-10):

$$R_2 = r_p \frac{kd}{ka} = 0{,}062 \frac{66}{21{,}5} = 0{,}19 \text{ Ом};$$

$$R_1 = r_p \frac{kc}{ka} = 0{,}062 \frac{200}{21{,}5} = 0{,}575 \text{ Ом},$$

где по (3.46)

$$r_p = \frac{E_{р.\,н}}{\sqrt{3}\, I_{р.\,н}} \cdot s = \frac{259}{\sqrt{3} \cdot 72} \times 0{,}03 = 0{,}062 \text{ Ом}.$$

С учетом (3.47) ступени пускового сопротивления при соединении звездой будут:

$$r_2 = r_p \frac{ad}{ka} = 0{,}062 \frac{44{,}5}{21{,}5} = 0{,}128 \text{ Ом}$$

и

$$r_1 = r_p \frac{dc}{ka} = 0{,}062 \frac{134}{21{,}5} = 0{,}386 \text{ Ом}.$$

Полное пусковое сопротивление

$$r_в = r_1 + r_2 = 0{,}386 + 0{,}128 = 0{,}514 \text{ Ом}.$$

Выбор материала и конструкций пусковых сопротивлений может быть произведен с помощью специальной литературы [3-2, 3-3].

3. В качестве схемы управления может быть принята схема, приведенная на рис. 3-10. Она отличается от рассмотренной ранее схемы рис. 3-8 лишь тем, что она составлена применительно к двум ступеням переключения пускового сопротивления вместо трех, а также тем, что здесь предусмотрено шунтирование нормально замкнутых контактов реле ускорения 1РУ и 2РУ блок-контактами контакторов ускорения 1У и 2У. Последнее обусловлено возможностью вибрации контактов реле ускорения при токах, близких к токам уставки этих реле [3-4].

Выбор конструкций аппаратуры управления можно произвести, пользуясь известной справочной литературой [3-5].

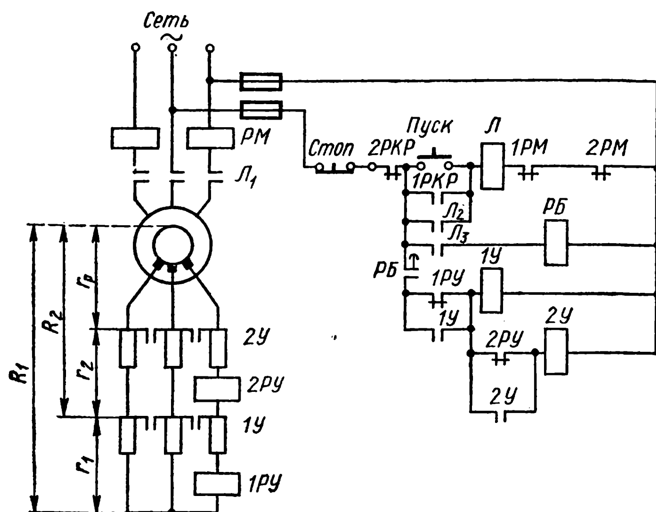


Рис. 3-10. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором (к примеру 1).

ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

У современных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором общего применения пусковой вращающий момент сравнительно низок и составляет порядка $(1,1 \div 2,0)m_н$. У двигателей с повышенным пусковым моментом он достигает значения $(1,7 \div 1,8)m_н$, а у двигателей с повышенным скольжением — близок к максимальному вращающему моменту $m_м$.

Что же касается пусковых токов, то у всех двигателей с короткозамкнутым ротором они очень большие и могут достигать шестикратного значения номинального тока и выше. Поэтому и для двигателей с короткозамкнутым ротором возникает необходимость в ограничении пусковых токов. Это достигается путем применения внешних пусковых сопротивлений в цепи статора, о чем подробнее будет сказано ниже после рассмотрения естественной и искусственной механических характеристик.

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Первый способ. В общем случае построение естественной механической характеристики можно выполнить, воспользовавшись точной формулой (3.10) для вращающего момента, которая в относительных единицах может быть представлена в виде

$$m = m_м \frac{2(1 + as_н)}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s} + 2as_к}, \tag{3.49}$$

где

$$a = \frac{r_c}{r'_р}; \quad s_к = \frac{r_c}{a\sqrt{r_c^2 + (x_c + x'_р)^2}}.$$

Второй способ. Если данные, необходимые для определения критического скольжения отсутствуют, то входящие в (3.49) величины a и $s_к$ могут быть получены [3-2] с помощью каталожных данных $s_н$, $m_{пуск}$ и $m_м$ для этих двигателей. Для этого уравнение (3.49) применительно к номинальному ($s = s_н$) и пусковому ($s = 1$) режимам можно записать в виде

$$m_н = m_м \frac{2(1 + as_к)}{\frac{s_н}{s_к} + \frac{s_к}{s_н} + 2as_к} \tag{3.50}$$

и

$$m_{пуск} = m_м \frac{2(1 + as_к)}{\frac{1}{s_к} + s_к + 2as_к}. \tag{3.51}$$

Решая (3.51) относительно величины a, найдем

$$a = \frac{\left(\frac{1}{s_к} + s_к\right) - 2\frac{m_м}{m_{пуск}}}{2s_к\left(\frac{m_м}{m_{пуск}} - 1\right)}. \tag{3.52}$$

Подставляя значение a в уравнение (3.50) и (3.51) и решая их совместно относительно критического скольжения, найдем

$$s_к = \frac{s_н + \sqrt{s_н\ A}}{1 + \sqrt{s_н \cdot A}}, \tag{3.53}$$

где

$$A = \frac{m_м - 1}{\frac{m_м}{m_{пуск}} - 1}. \tag{3.54}$$

Подставляя полученные значения для величин a и $s_к$ в уравнение (3.49), можно построить естественную механическую характеристику для короткозамкнутых двигателей на основе паспортных данных, указанных выше.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЦЕПИ СТАТОРА КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для расчета искусственных механических характеристик короткозамкнутых двигателей необходимо определить внутреннее сопротивление обмотки статора $r_с$ и сопротивление $x_к = x_с + x'_р$, а также внешние сопротивления $r_в$ или $x_в$ в цепи статора (рис. 3-11).

Внутренние сопротивления можно определить [3-2] исходя из уравнения (3.8) для пускового вращающего момента

$$M_{вр.\ пуск} = \frac{3U_с^2 r'_р}{\omega_с [(r_с + r'_р)^2 + (x_с + x'_р)^2]},$$

где $U_с$ — фазное напряжение статора;

$\omega_с$ — синхронная скорость вращения $\left(\omega_с = \frac{2\pi n_с}{60}\right)$.

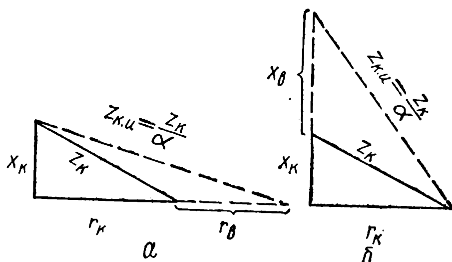


Рис. 3-11. Определение внешних сопротивлений $r_в$ и $x_в$, включаемых в цепи статоров короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Обозначая постоянную величину

$$\frac{3U_с^2}{\omega_с} = \frac{3U_с^2 \cdot 60}{2\pi n_с} = \frac{90U_с^2}{\pi n_с} = C \qquad (3.55)$$

и учитывая, что согласно (3.19)

$$(r_с + r'_р)^2 + (x_с + x'_р)^2 = z_к^2, \qquad (3.56)$$

уравнение принимает вид

$$M_{вр.\ пуск} = C \frac{r'_р}{z_к^2}, \qquad (3.57)$$

откуда приведенное активное сопротивление ротора

$$r'_р = M_{вр.\ пуск} \frac{z_к^2}{C}. \qquad (3.58)$$

Здесь $z_к$ — полное сопротивление короткого замыкания, которое при соединении фаз в звезду будет

$$z_к = \frac{U}{\sqrt{3} I_{пуск}}, \qquad (3.59)$$

где U — линейное напряжение.

Активное и искомое реактивное сопротивления короткого замыкания при этом будут

$$\left.\begin{aligned} r_к &\cong r_с + r'_р = z_к \cos \varphi_{пуск}, \\ x_к &\cong x_с + x'_р = z_к \sin \varphi_{пуск}, \end{aligned}\right\} \quad (3.60)$$

откуда искомое сопротивление обмотки статора

$$r_с = z_к \cos \varphi_{пуск} - r'_р. \quad (3.61)$$

Входящий в (3.61) пусковой коэффициент мощности можно определить [3-2] по формуле*

$$\cos \varphi_{пуск} = \cos \varphi_н \left[m_{пуск. е} \frac{\eta_н}{(1 - s_н) I_{*пуск. е}} + \gamma I_{*пуск. е} (1 - \eta_н) \right], \quad (3.62)$$

где

$$\eta_н = \frac{P_н}{\sqrt{3} U_н I_н \cos \varphi_н}; \quad (3.63)$$

$m_{пуск. е}$ и $I_{пуск. е}$ — естественные пусковой момент и ток в относительных единицах;

γ — коэффициент, характеризующий потери в обмотке статора, принимаемый в среднем $\gamma = \frac{1}{3}$.

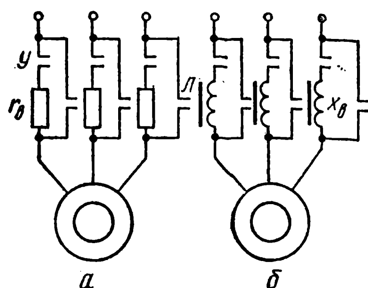


Рис. 3-12. Включение внешних сопротивлений в цепи статора:

а — активного сопротивления; *б* — реактивного сопротивления.

При соединении обмоток статора в треугольник его сопротивления могут быть найдены путем пересчета [3-2].

Внешние сопротивления в цепи статора $r_в$ или $x_в$ служат для ограничения пускового тока асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором средней и большой мощности. Для расчета этих сопротивлений необходимо задаться искусственными пусковым моментом $m_{пуск. и}$ и пусковым током $I_{пуск. и}$. Тогда отношения заданных тока и момента к естественным можно обозначить через коэффициенты:

$$\alpha = \frac{I_{пуск. и}}{I_{пуск. е}} = \frac{U_{пуск}}{U}$$

и

$$\mu = \alpha^2 = \frac{m_{пуск. и}}{m_{пуск. е}} = \left(\frac{U_{пуск.}}{U}\right)^2.$$

---

* Более точно его можно определить по справочнику [3-6] как среднее значение двух выражений и с более точным учетом потерь.

Определение заданных величин искусственных тока или момента должно выполняться для режима заторможенного двигателя ($s = 1$) через полное сопротивление

$$z_{к.\,и} = \frac{z_к}{a} = \frac{z_к}{\sqrt{\mu}}.$$

При этом требуемые активное и реактивное сопротивления определяются из рис. 3-11 по формулам

$$\left.\begin{aligned} r_в &= \sqrt{\left(\frac{z_к}{a}\right)^2 - x_к^2} - r_к; \\ x_в &= \sqrt{\left(\frac{z_к}{a}\right)^2 - r_к^2} - x_к. \end{aligned}\right\} \tag{3.64}$$

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Расчет и построение искусственных механических характеристик двигателей с короткозамкнутым ротором могут быть выполнены на основе точного уравнения (3.33), которое в этом случае удобно записать в виде

$$M_{вр.\,и} = M_{вр.\,макс.и} \frac{2(1 + a_и \cdot s_{к.\,и})}{\frac{s}{s_{к.\,и}} + \frac{s_{к.\,и}}{s} + 2a_и \cdot s_{к.и}}. \tag{3.65}$$

Входящие в (3.65) величины при включении внешнего активного сопротивления $r_в$ определяются [3-2] по формулам

$$M_{вр.\,макс.\,и} = M_{вр.\,макс.\,е} \frac{r_с + \sqrt{r_с^2 + x_к^2}}{(r_с + r_в) + \sqrt{(r_с + r_в)^2 + x_к^2}}; \tag{3.66}$$

$$s_{к.\,и} = s_{к.\,е} \frac{\sqrt{r_с^2 + x_к^2}}{\sqrt{(r_с + r_в)^2 + x_к^2}}; \tag{3.67}$$

$$a_и = a_е \frac{r_с + r_в}{r_е}. \tag{3.68}$$

При включении внешнего индуктивного сопротивления $x_в$ величины $M_{вр.\,макс.\,и}$, $s_{к.\,и}$ и $a_и$ могут быть определены по аналогичным формулам.

МОМЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИВОДИМОГО В ДВИЖЕНИЕ МЕХАНИЗМА

Исходя из уравнения движения (3.20) избыточный момент

$$M_{изб} = M_{вр} - M_с,$$

где $M_с$ — момент сопротивления приводимого в движение механизма.

Для большинства вращающихся механизмов, применяемых на электрических станциях и подстанциях, момент сопротивления можно выразить [3-7] формулой

$$M_с = M_{с.\ нач} + (M_{с.\ н} - M_{с.\ нач})\left(\frac{n}{n_н}\right)^p, \tag{3.69}$$

где $M_{с.\ нач}$ — начальный момент сопротивления вращающегося механизма;

$M_{с.\ н}$ — номинальный момент сопротивления механизма;

n, $n_н$ — текущая и номинальная скорости вращения механизма;

p — коэффициент, характеризующий изменение момента сопротивления механизма при изменении скорости вращения.

Разделив обе части уравнения (3.69) на номинальный момент сопротивления механизма $M_{с.\ н}$ и выражая относительную скорость вращения через скольжение, т. е.

$$\frac{n}{n_н} = v = 1 - s,$$

получим момент сопротивления механизма в относительных единицах:

$$\frac{M_с}{M_{с.\ н}} = \frac{M_{с.\ нач}}{M_{с.\ н}} + \left(1 - \frac{M_{с.\ нач}}{M_{с.\ н}}\right)(1 - s)^p,$$

или

$$m_с = m_{с.\ нач} + (1 - m_{с.\ нач})(1 - s)^p. \tag{3.70}$$

При $p = 0$ момент сопротивления механизма не зависит от скорости вращения, т. е.

$$m_с = 1. \tag{3.71}$$

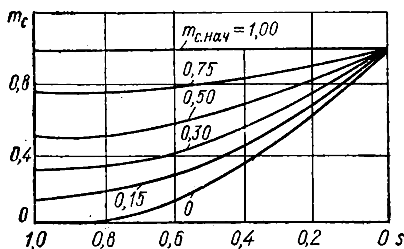


Рис. 3-13. Кривые изменения момента сопротивления механизма вентиляторного типа.

При $p = 2$ получается момент сопротивления распространенных механизмов вентиляторного типа, т. е.

$$m_с = m_{с.\ нач} + (1 - m_{с.\ нач})(1 - s)^2. \tag{3.72}$$

На электрических станциях к механизмам с постоянным моментом сопротивления относятся шаровые мельницы, транспортеры, грузоподъемные краны, компрессоры и пр. К механизмам с вентиляторным моментом сопротивления относятся дымососы, вентиляторы, некоторые центробежные насосы и пр.

Для циркуляционных, питательных и конденсатных насосов показатель степени $p = 5 \div 6$.

Значения начального (пускового) момента сопротивления $m_{с.\ нач}$ для различных механизмов как при пуске их без нагрузки, так и с нагрузкой, приводятся в справочной литературе [3-6].

На рис. 3-13 приведены кривые изменения момента сопротивления механизма вентиляторного типа $m_с = \frac{M_с}{M_{с\,н}}$ в зависимости от скольжения s и начального момента сопротивления $m_{с.\,нач}$. Зная начальный момент сопротивления $m_{с.\,нач}$, можно по соответствующей кривой найти значения момента сопротивления $m_с$ для ряда значений скольжения s и затем построить механическую характеристику $m_с = f(s)$.

Если номинальный момент сопротивления механизма $M_{с.\,н}$ не равен номинальному вращающему моменту двигателя $M_{вр.\,н}$, то для приведения его к координатам этого двигателя уравнение момента (3.72) должно быть записано в виде

$$m'_с = km_с = k[m_{с.\,нач} + (1 - m_{с.\,нач})(1 - s)^2], \qquad (3.73)$$

где $k = \frac{M_{с.\,н}}{M_{вр.\,н}} = \frac{m_{с.\,н}}{m_н}$ — отношение номинального момента сопротивления механизма к номинальному моменту двигателя.

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ В ЦЕПИ СТАТОРА

Примерная схема автоматического управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором и активным внешним сопротивлением в цепи статора приведена на рис. 3-14.

Схема подготавливается к пуску двигателя включением выключателя Р. При этом выпрямленное с помощью вентиля ВК напряжение подается на реле ускорения РУ, которое срабатывает, замыкает свой нормально открытый контакт в цепи обмотки контактора ускорения У и размыкает замкнутый контакт в цепи линейного контактора Л.

П у с к д в и г а т е л я. При нажатии кнопки «Пуск» или срабатывании технологического реле контроля режима 1РКР срабатывает контактор У и подключает двигатель к сети через пусковые сопротивления $r_в$, а также замыкает один свой контакт в цепи обмотки контактора Л и размыкает другой в цепи обмотки реле РУ.

Замедление реле ускорения РУ выбрано равным времени достижения двигателем скорости вращения, близкой к установившейся. По истечении этого замедления реле РУ замыкает свой контакт в цепи обмотки контактора Л и размыкает контакт в цепи контактора У. Линейный контактор Л, получив питание, срабатывает, закорачивает своими главными контактами $Л_1$ пусковые сопротивления $r_в$ и этим переводит двигатель на естественную механическую характеристику (прямая *аб*, рис. 3-15), т.е. подводит к двигателю полное напряжение. Одновременно блок-контактом $Л_2$ отключается обмотка контактора У, а блок-контактом $Л_3$ контактор Л берет себя на самопитание. На этом пуск двигателя заканчивается.

О с т а н о в д в и г а т е л я. Останов двигателя осуществляется либо от руки с помощью кнопки «Стоп», либо автоматически после

срабатывания реле контроля режима 2РКР, а также реле защиты от коротких замыканий 1РМ, 2РМ или реле защиты от перегрузки 1РТ, 2РТ.

Цепи управления защищаются предохранителями.

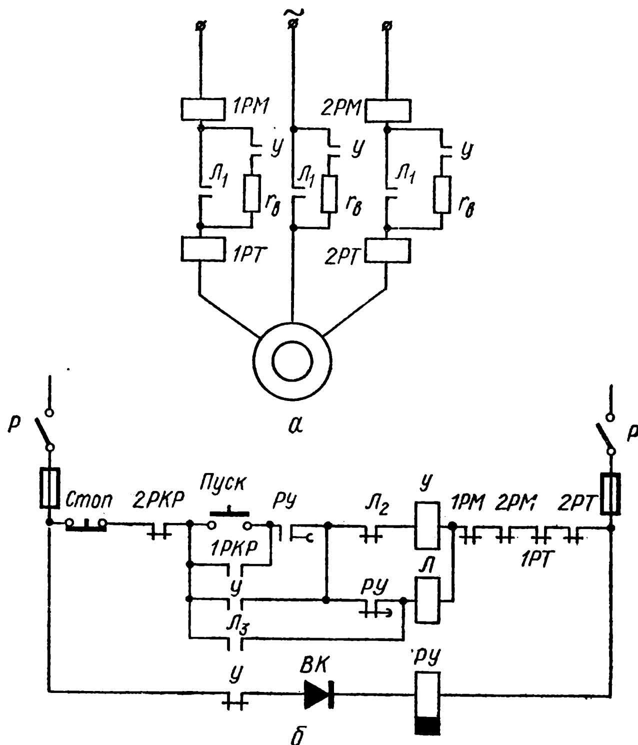


Рис. 3-14. Схема автоматического управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором:

а — силовые цепи; *б* — цепи управления.

Пример 2. *Дано:* асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа МТК-51-8 мощностью $P_н = 22$ кВт; $U_н = 380$ В; $n_н = 692$ об/мин ($n_0 = 750$ об/мин); $m_м = 3{,}1$; $m_{пуск} = 2{,}8$; $I_{*пуск} = 5{,}0$; $I_н = 52{,}6$ А; $\cos\varphi_н = 0{,}77$. Соединение обмоток статора в звезду. Пуск производится при внешнем активном сопротивлении (рис. 3-12, *а*).

Двигатель приводит во вращение центробежный насос с моментом сопротивления, равным 0,9 номинального вращающего момента двигателя, т. е. коэффициент

$$k = \frac{M_{с.\,н}}{M_{вр.\,н}} = 0{,}9.$$

Насос пускается при открытой задвижке и имеет начальный пусковой момент сопротивления, равный 30% момента насоса при номинальной скорости вращения, т. е. $M_{о.\,нач} = 0{,}3M_{с.\,н}$.

Требуется: 1. Определить значения внешних сопротивлений $r_в$ в цепи статора, необходимые для снижения пускового момента в два раза, т. е. до $1{,}4m_н$.

2. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику двигателя.

3. Рассчитать и построить искусственную механическую характеристику при симметричном внешнем активном сопротивлении $r_в$ в цепи статора.

4. Рассчитать и построить механическую характеристику насоса в координатах вращающего момента двигателя.

Решение. 1. Определим значение внешнего сопротивления $r_в$. Требуемое относительное снижение пускового момента на искусственной характеристике

$$\mu = \frac{m_{пуск.и}}{m_{пуск.е}} = 0{,}5 = \alpha^2,$$

откуда

$$\alpha = \sqrt{0{,}5} = 0{,}707.$$

Определяем сопротивления при пуске ($s = 1$) на естественной характеристике.

Полное сопротивление короткого замыкания ($s = 1$) при соединении статора в звезду по (3.59)

$$z_к = \frac{U_н}{\sqrt{3} I_{пуск}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 5{,}0 \cdot 52{,}6} = 0{,}835 \text{ Ом}.$$

Активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания по (3.60) будут

$$r_к = z_к \cos\varphi_{пуск} = 0{,}835 \cdot 0{,}61 = 0{,}51 \text{ Ом}$$

и

$$x_к = z_к \sin\varphi_{пуск} = 0{,}835 \cdot 0{,}79 = 0{,}66 \text{ Ом},$$

где с учетом (3.62), (3.63) и (3.1)

$$\cos\varphi_{пуск} = \cos\varphi_н \left[m_{пуск.е} \frac{\eta_н}{(1 - s_н) I_{*пуск.е}} + \gamma I_{*пуск.е} (1 - \eta_н) \right] =$$

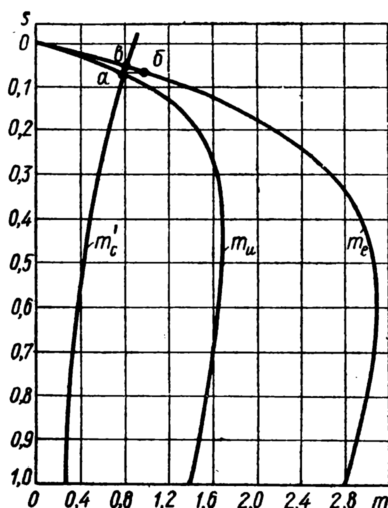


Рис. 3-15. Построение естественной и искусственной механических характеристик и кривой изменения момента сопротивления нагрузки (к примеру 2).

$$= 0{,}77 \left[2{,}8 \frac{0{,}826}{(1 - 0{,}077) 5{,}0} + \frac{1}{3} \cdot 5{,}0 (1 - 0{,}826) \right] = 0{,}61;$$

$$\sin\varphi_{пуск} = 0{,}79;$$

$$\eta_н = \frac{P_н}{\sqrt{3} U_н I_н \cos\varphi_н} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 52{,}6 \cdot 0{,}77} = 0{,}826;$$

$$s_н = \frac{750 - 692}{750} = 0{,}077; \quad \gamma = \frac{1}{3}.$$

Номинальный вращающий момент двигателя по (2.1)

$$M_{вр.н} = 9550 \frac{P_н}{n_н} = 9550 \frac{22}{692} = 304 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой вращающий момент

$$M_{вр.пуск} = M_{вр.н} \cdot m_{пуск} = 304 \cdot 2{,}8 = 850 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Постоянная величина C по (3.55)

$$C = \frac{90U_c^2}{\pi n_c} = \frac{90\left(\frac{380}{\sqrt{3}}\right)^2}{3,14 \cdot 750} = \frac{90 \cdot 220^2}{3,14 \cdot 750} = 1850.$$

Приведенное активное сопротивление ротора по (3.58)

$$r'_р = M_{вр.пуск} \frac{z_к^2}{C} = 850 \frac{0,835^2}{1850} = 0,32 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление обмотки статора по (3.61)

$$r_c = z_к \cos \varphi_{пуск} - r'_р = 0,835 \cdot 0,61 - 0,32 = 0,19 \text{ Ом}.$$

Тогда искомое значение внешнего активного сопротивления в цепи статора по (3.64) будет

$$r_в = \sqrt{\left(\frac{z_к}{a}\right)^2 - x_к^2} - r_к = \sqrt{\left(\frac{0,835}{0,707}\right)^2 - 0,66^2} - 0,51 = 0,47 \text{ Ом}.$$

2. Рассчитаем и построим естественную механическую характеристику. Величина A по (3.54)

$$A = \frac{m_м - 1}{\frac{m_м}{m_{пуск}} - 1} = \frac{3,1 - 1}{\frac{3,1}{2,8} - 1} = \frac{2,1}{0,107} = 19,6.$$

Критическое скольжение по (3.53)

$$s_{к.е} = \frac{s_н + \sqrt{s_н A}}{1 + \sqrt{s_н A}} = \frac{0,077 + \sqrt{0,077 \cdot 19,6}}{1 + \sqrt{0,077 \cdot 19,6}} = 0,586.$$

Величина a_e по (3.52)

$$a_e = \frac{\left(\frac{1}{s_{к.е}} + s_{к.е}\right) - 2\frac{m_м}{m_{пуск}}}{2s_{к.е}\left(\frac{m_м}{m_{пуск}} - 1\right)} = \frac{\left(\frac{1,0}{0,586} + 0,586\right) - 2\frac{3,1}{2,8}}{2 \cdot 0,586\left(\frac{3,1}{2,8} - 1\right)} = 0,65.$$

Подставляя полученные значения величин $s_{к.е}$, a_e и $m_{м.е}$ в (3.49), получим для естественной характеристики

$$m_e = m_{м.е} \frac{2(1 + a_e \cdot s_{к.е})}{\frac{s}{s_{к.е}} + \frac{s_{к.е}}{s} + 2a_e \cdot s_{к.е}} = 3,1 \frac{2(1 + 0,65 \cdot 0,586)}{\frac{s}{0,585} + \frac{0,585}{s} + 2 \cdot 0,65 \cdot 0,586} =$$

$$= \frac{8,56}{\frac{s}{0,586} + \frac{0,586}{s} + 0,76}.$$

Задаваясь значениями скольжения от $s = 1$ до $s = 0$, получим следующие значения вращающего момента на искомой естественной характеристике:

s	1,0	0,75	0,7	0,586	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,077	0
m_e	2,8	3,04	3,07	3,1	3,08	2,95	2,67	2,13	1,26	1,0	0

По этим данным строим естественную механическую характеристику (рис. 3-15).

3. Рассчитаем и построим искусственную механическую характеристику при включении во внешнюю цепь статора пускового активного сопротивления $r_в = 0{,}47$ Ом. Для этого воспользуемся формулой (3.65), для которой предварительно определим по (3.66—3.68) входящие в нее величины. По (3.66) в относительных единицах получим

$$m_{м.и} = m_{м.е} \frac{r_с + \sqrt{r_с^2 + x_к^2}}{(r_с + r_в) + \sqrt{(r_с + r_в)^2 + x_к^2}} =$$

$$= 3{,}1 \frac{0{,}19 + \sqrt{0{,}19^2 + 0{,}66^2}}{(0{,}19 + 0{,}47) + \sqrt{(0{,}19 + 0{,}47)^2 + 0{,}66^2}} = 1{,}7.$$

По (3.67)

$$s_{к.и} = s_{к.е} \frac{\sqrt{r_с^2 + x_к^2}}{\sqrt{(r_с + r_в)^2 + x_к^2}} = 0{,}586 \frac{\sqrt{0{,}19^2 + 0{,}66^2}}{\sqrt{(0{,}19 + 0{,}47)^2 + 0{,}66^2}} = 0{,}43.$$

По (3.68) найдем

$$a_и = a_е \frac{r_с + r_в}{r_с} = 0{,}65 \frac{0{,}19 + 0{,}47}{0{,}19} = 2{,}25.$$

Тогда по (3.65) в относительных единицах получим

$$m_и = m_{м.и} \frac{2(1 + a_и \cdot s_{к.и})}{\frac{s}{s_{к.и}} + \frac{s_{к.и}}{s} + 2a_и \cdot s_{к.и}} = 1{,}7 \frac{2(1 + 2{,}25 \cdot 0{,}43)}{\frac{s}{0{,}43} + \frac{0{,}43}{s} + 2 \cdot 2{,}25 \cdot 0{,}43} =$$

$$= \frac{6{,}7}{\frac{s}{0{,}43} + \frac{0{,}43}{s} + 1{,}94}.$$

Задаваясь значениям скольжения от $s = 1$ до $s = 0$, получим следующие значения вращающего момента на искусственной механической характеристике при включении во внешнюю цепь статора пускового активного сопротивления $r_в = 0{,}47$ Ом:

s	1	0,85	0,75	0,6	0,43	0,3	0,2	0,1	0,077	0
$m_и$	1,4	1,51	1,58	1,65	1,7	1,64	1,47	1,04	0,87	0

Эту кривую строим также на рис. 3-15.

4. Рассчитаем и построим механическую характеристику насоса в координатах вращающего момента двигателя. Для этого на графике рис. 3-13 по кривой для начального момента сопротивления $m_{с.нач} = 0{,}3$ определяем значения моментов сопротивления $m_с$ при различных значениях скольжения s и заносим в таблицу. Умножая эти значения на коэффициент $k = 0{,}9$, получаем значения момента $m_с'$ в координатах двигателя и также заносим в таблицу:

s	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$m_с$	1,0	0,75	0,55	0,41	0,33	0,3
$m_с'$	0,9	0,67	0,5	0;37	0,3	0,27

По этим данным на рис. 3-15 в координатах двигателя строим кривую $m_с' = f(s)$ изменения момента сопротивления насоса в зависимости от скольжения.

Из рассмотрения графика рис. 3-15 следует, что при пуске двигателя через внешнее сопротивление, т. е. при разгоне по искусственной механической характеристике $m_{и}$ до скольжения, соответствующего равенству вращающего момента нагрузочному моменту сопротивления (точка *а*), должен замыкаться контактор ускорения, шунтирующий пусковые сопротивления. При этом двигатель переходит (прямая *аб*) на естественную механическую характеристику (точка *б*).

Глава четвертая

РАСЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И КОМПЕНСАТОРОВ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как уже было сказано, синхронные двигатели находят широкое применение в нерегулируемых приводах средней и большой мощности, таких как циркуляционные насосы (обеспечивающие циркуляцию воды в конденсаторе турбины или в воздухоохладителе генератора), питательные насосы котлов высокого давления, компрессоры и т. п.

К преимуществам синхронных двигателей относятся: более высокий коэффициент полезного действия, чем у асинхронных; меньшая чувствительность к колебаниям напряжения сети, поскольку их вращающий момент пропорционален первой степени напряжения, тогда как у асинхронных двигателей он пропорционален квадрату напряжения; возможность работы синхронного двигателя в режиме перевозбуждения с опережающим (емкостным) током, т.е. в режиме синхронного компенсатора.

К недостаткам синхронных двигателей относится наличие возбудителя и более высокая стоимость по сравнению с короткозамкнутыми асинхронными двигателями.

Синхронные компенсаторы предназначаются главным образом для работы в качестве генераторов реактивной мощности и поэтому служат для улучшения коэффициента мощности и регулирования напряжения сети. Компенсаторы размещаются на подстанциях по возможности ближе к центрам потребления реактивной мощности.

Основным способом пуска синхронных двигателей и компенсаторов в настоящее время является асинхронный пуск, который, благодаря наличию на роторе пусковой обмотки, производится аналогично пуску двигателей с короткозамкнутым ротором. Обмотка статора включается в сеть при номинальном или пониженном напряжении. В соответствии с этим различают прямой, реакторный и автотрансформаторный пуски.

Наиболее простым и надежным является прямой пуск, область применения которого расширяется по мере роста мощностей энергосистем. В тех случаях, когда прямой пуск применить нельзя по причине недо-

пустимого снижения напряжения на шинах, от которых могут питаться нагрузки, применяют реакторный пуск (рис. 4-1, *б*). Весьма редко, только в тех случаях, когда нельзя применить реакторный пуск (например, при недопустимом снижении вращающего момента) может быть оправдан автотрансформаторный пуск.

В процессе асинхронного пуска, осуществляемого включением в сеть статорной обмотки, на кривой вращающего момента $M_{вр} = f(s)$ отмечают следующие два характерных его значения (рис. 4-2):

а) пусковой вращающий момент $M_{вр.\,пуск}$, развиваемый синхронным двигателем в начальный момент пуска ($s = 1$);

б) подсинхронный, или входной вращающий момент $M_{вр.\,вх}$, развиваемый двигателем при 95% синхронной скорости ($s = 0{,}05$).

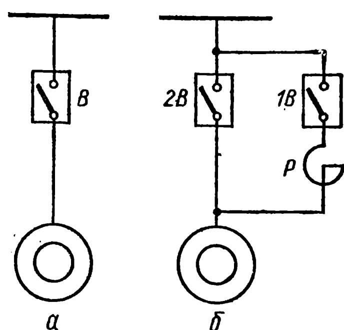


Рис. 4-1. Распространенные способы пуска синхронных двигателей и компенсаторов:
а — прямой пуск; *б* — реакторный пуск.

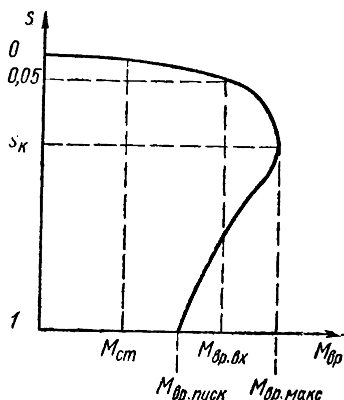


Рис. 4-2. Пусковой и входной вращающие моменты синхронного двигателя.

Для того чтобы двигатель тронулся с места, пусковой момент должен превышать статический момент $M_{ст}$ сопротивления нагрузки ($M_{вр.\,пуск} > M_{ст}$). А для того чтобы двигатель мог достигнуть в асинхронном режиме 95% синхронной скорости вращения, входной момент $M_{вр.\,вх}$ должен быть больше или равен статическому моменту нагрузки ($M_{вр.\,вх} \geqslant M_{ст}$).

Пусковой и входной моменты должны выбираться в зависимости от характера приводимого в движение механизма или от скорости нарастания статического момента нагрузки. Для механизмов с плавным нарастанием статического момента (вентиляторов, центробежных насосов, турбокомпрессоров) требуется небольшой пусковой и большой входной моменты:

$$M_{вр.\,пуск} = (0{,}4 \div 0{,}5)\, M_{вр.\,н}$$

и

$$M_{вр.\,вх} = (0{,}8 \div 1{,}0)\, M_{вр.\,н}.$$

Для двигателей с большим постоянным статическим моментом сопротивления нагрузки могут потребоваться большой пусковой и большой входной моменты:

$$M_{\text{вр. пуск}} = (1{,}0 \div 1{,}3)\, M_{\text{вр. н}}$$

и

$$M_{\text{вр. вх}} = (0{,}8 \div 1{,}0)\, M_{\text{вр. н}}$$

СПОСОБЫ ПОДАЧИ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Известно несколько способов подачи тока возбуждения. Если иметь в виду наиболее распространенные машинные возбудители, то можно говорить о двух основных способах подачи тока возбуждения в цепь ротора синхронного двигателя или компенсатора при их пуске.

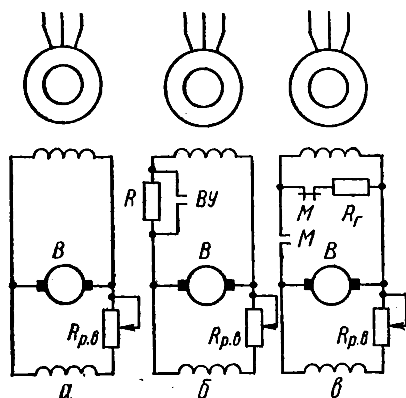


Рис. 4-3. Способы подачи тока возбуждения:

а — обмотка возбуждения подключена наглухо к якорю возбудителя; *б* — обмотка возбуждения подключена через активное сопротивление *R*, шунтируемое в конце пуска контактами вспомогательного устройства; *в* — обмотка возбуждения включена на гасильное сопротивление $R_г$ с последующим переключением при подсинхронной скорости на якорь возбудителя.

П е р в ы й с п о с о б. Обмотка возбуждения подключена наглухо к якорю возбудителя (рис. 4-3, *а*), независимо от режима работы. В этом случае во время пуска возбуждение двигателя или компенсатора нарастает по мере увеличения скорости вращения. Такое преждевременное нарастание тока возбуждения в процессе пуска нежелательно, поскольку оно ведет к ухудшению условий вхождения машины в синхронизм в результате возникающего при этом «провала» в кривой вращающего момента вблизи полусинхронной скорости вращения [4-1].

Для синхронных компенсаторов, имеющих незначительный момент сопротивления, наличие такого «провала» в кривой момента не имеет существенного значения, и они легко развернутся до нормальной скорости вращения, тогда как синхронные двигатели со значительным моментом сопротивления по этой причине могут и не развернуться, «зависнув» на полусинхронных оборотах. Преждевременное нарастание тока возбуждения вызывает, кроме того, колебания тока статора, что при относительно небольшой мощности источника питания может обусловить значительные колебания напряжения на шинах двигателя или компенсатора, к которым могут быть подключены также другие потребители.

Указанные явления обнаруживаются тем сильнее, чем больше скорость нарастания возбуждения. Анализ показывает, что скорость нарастания возбуждения можно уменьшить, если увеличить сопротивление в цепи возбуждения возбудителя, установив шунтовой реостат,

например, в положение холостого хода. В случае автоматизированного процесса пуска для этой цели устанавливается дополнительное сопротивление R (рис. 4-3, *б*), которое в конце пуска или после втягивания двигателя в синхронизм автоматически шунтируется контактами вспомогательного устройства ВУ.

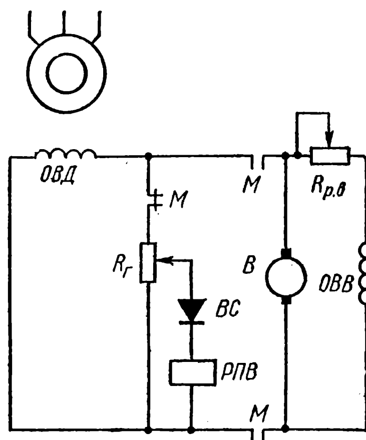


Рис. 4-4. Схема подачи возбуждения с контактором *М* (АГП), управляемым с помощью реле подачи возбуждения РПВ.

Второй способ. Обмотка возбуждения синхронного двигателя в целях облегчения разворота в асинхронном режиме с $M_{ст} > 0{,}35M_{вр.\,н}$ замкнута на активное разрядное (гасильное) сопротивление $R_г$ с отключением ее от возбудителя (рис. 4-3, *в*). Величина гасильного сопротивления принимается порядка (5—10)-кратного значения активного сопротивления обмотки возбуждения. При достижении двигателем подсинхронной скорости обмотка возбуждения переключается на якорь возбудителя, и под действием синхронного момента, совершив несколько затухающих качаний относительно оси магнитного поля статора, ротор двигателя втягивается в синхронизм. Двигатель втягивается в синхронизм тем быстрее, чем он меньше нагружен.

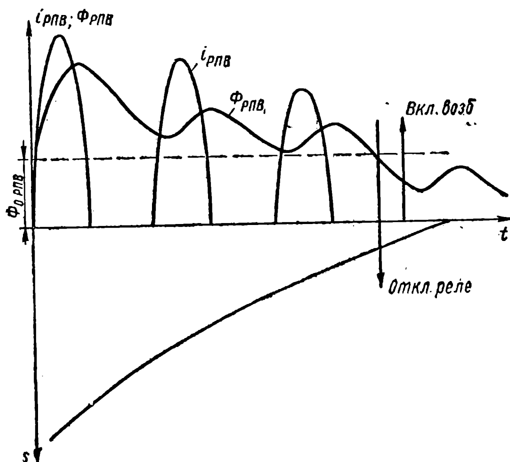


Рис. 4-5. Кривые изменения тока и потока реле подачи возбуждения РПВ с изменением скольжения.

При втором способе подачи тока возбуждения используется схема рис. 4-4 с контактором *М*, управляемым с помощью реле подачи возбуждения РПВ.

Обмотка реле РПВ подключается через селеновый выпрямитель ВС к части разрядного сопротивления $R_г$, в результате чего в процессе пуска в обмотке реле РПВ протекают импульсы однополярного тока $i_{РПВ}$, частота которых уменьшается по мере уменьшения скольжения s (рис. 4-5). В начальный момент пуска двигателя интервалы между полупериодами тока одного направления малые и реле подачи возбуждения не успевает отпасть, поскольку магнитный поток $Ф_{РПВ}$, поддерживаемый наводимыми в медной гильзе токами,

не успевает в эти интервалы снизиться до потока отпускания $Ф_{оРПВ}$ реле.

При достижении подсинхронной скорости интервалы между полупериодами тока $i_{РПВ}$ увеличиваются, поток $Ф_{РПВ}$, уменьшаясь, достигнет значения потока опускания, и РПВ отпустит якорь, подавая через нормально замкнутые контакты питание на обмотку контактора *М*. Последний срабатывает, его нормально замкнутый контакт в цепи разрядного сопротивления размыкается, а два других контакта в цепи питания обмотки ротора замыкаются, подключая ее к возбудителю.

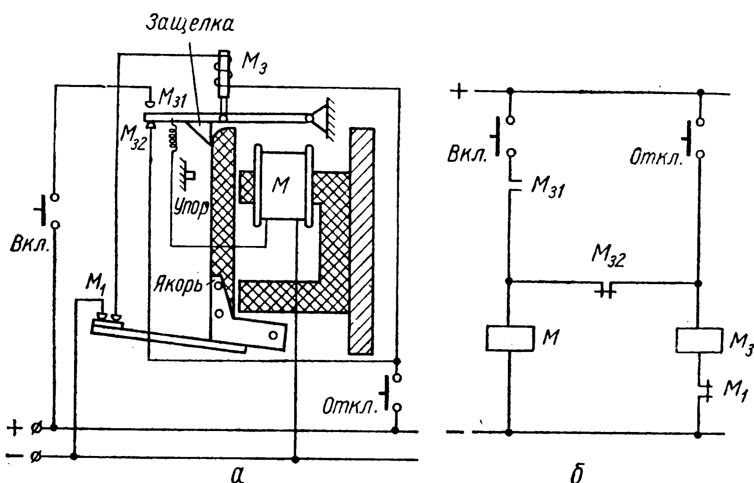


Рис. 4-6. Схема привода контактора *М*:
а — кинематическая; *б* — в развернутом виде.

В качестве контактора *М*, контакты которого показаны в цепи подачи возбуждения (рис. 4-4), обычно применяется контактор с защелкой, схема которого приведена на рис. 4-6. Контактор показан во включенном положении, и якорь его главного электромагнита механически заперт защелкой. Контакты $М_1$ и $М_{32}$ замкнуты, $М_{31}$ разомкнут.

Для отключения контактора необходимо замкнуть цепь обмотки отключения $М_3$ на источник питания. Это можно сделать, например, путем замыкания кнопки «Откл.». При этом не только получает питание обмотка отключения $М_3$, но и кратковременно замыкается цепь питания обмотки включения М. В результате действия электромагнита *М* кратковременно притягивается якорь сердечника, освобождая зуб защелки. Якорь электромагнита отключения $М_3$ поднимает рычаг вместе с зубом защелки и размыкает контакт $М_{32}$. Электромагнит включения *М*, потеряв питание, отпадает и размыкает главные контакты *М* контактора (рис. 4-4). Таким образом, в отключенном положении контактора его контакты $М_1$ и $М_{32}$ разомкнуты, $М_{31}$ замкнут.

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И КОМПЕНСАТОРОВ

Строго говоря, при асинхронном пуске синхронных машин с подключенным возбудителем их механические характеристики определяются не только величиной асинхронного момента, создаваемого пусковой обмоткой, как в асинхронном двигателе, но и дополнительными моментами, создаваемыми обмоткой возбуждения, в которой при пуске возникает однофазное пульсирующее поле, обусловленное вращающимся полем статора. Это пульсирующее поле ротора может быть разложено на два поля, вращающихся относительно ротора в разные стороны. При взаимодействии статорных токов с одним из этих полей создается дополнительный вращающий момент, который суммируется с асинхронным моментом пусковой обмотки. При взаимодействии с другим полем создается вращающий момент, который при $s > 0{,}5$ суммируется с асинхронным моментом, а при $s < 0{,}5$ — вычитается из асинхронного момента двигателя. Это обстоятельство и приводит к тому, что при скольжении $s = 0{,}5$ возникает указанный выше «провал» в кривой вращающего момента, ухудшающий условия разгона двигателя.

Расчет естественной механической характеристики синхронного двигателя или компенсатора с учетом указанных выше дополнительных вращающих моментов, создаваемых обмоткой возбуждения, представляет собой значительные трудности. Поэтому для практических целей ограничиваются приближенной естественной характеристикой, представляющей собой зависимость асинхронного момента, создаваемого только пусковой обмоткой, от величины скольжения. При этом идут на дополнительное упрощение, пользуясь уравнением Клосса в виде

$$m = m_{м} \frac{2}{\frac{s}{s_{к}} + \frac{s_{к}}{s}}. \tag{4.1}$$

Это уравнение для пускового момента ($s = 1$) перепишется в виде

$$m_{пуск} = m_{м} \frac{2}{\frac{1}{s_{к}} + s_{к}}, \tag{4.2}$$

а для входного момента ($s = 0{,}05$) — в виде

$$m_{вх} = m_{м} = \frac{2}{\frac{0{,}05}{s_{к}} + \frac{s_{к}}{0{,}05}}. \tag{4.3}$$

Уравнения (4.2) и (4.3) можно соответственно представить в виде

$$2m_{м} = m_{пуск}\left(\frac{1}{s_{к}} + s_{к}\right)$$

и

$$2m_{\text{м}} = m_{\text{вх}}\left(\frac{0{,}05}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{0{,}05}\right).$$

Приравнивая правые части и решая полученное уравнение относительно $s_{\text{к}}$, найдем для естественной механической характеристики выражение для критического скольжения $s_{\text{к. е}}$ в виде

$$s_{\text{к. е}} = \frac{\sqrt{\dfrac{m_{\text{пуск}}}{m_{\text{вх}}} - 0{,}05}}{\sqrt{20 - \dfrac{m_{\text{пуск}}}{m_{\text{вх}}}}}. \qquad (4.4)$$

Соответствующая величина максимального момента с учетом (4.2) определится из выражения

$$m_{\text{м. е}} = \frac{m_{\text{пуск}}}{2}\left(\frac{1}{s_{\text{к. е}}} + s_{\text{к. е}}\right). \qquad (4.5)$$

Тогда расчетная формула для определения естественной механической характеристики с учетом (4.1) будет

$$m_{\text{е}} = m_{\text{м. е}}\frac{2}{\dfrac{s}{s_{\text{к. е}}} + \dfrac{s_{\text{к.е}}}{s}}. \qquad (4.6)$$

Из изложенного следует, что для построения естественной механической характеристики синхронных двигателей достаточно знать величины пускового $m_{\text{пуск}}$ и входного $m_{\text{вх}}$ вращающих моментов в процессе асинхронного пуска этих двигателей.

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И КОМПЕНСАТОРОВ

Если прямой пуск синхронного двигателя или компенсатора нельзя осуществить по причине недопустимого снижения напряжения на шинах, от которых питаются потребители, то применяют либо реакторный, либо автотрансформаторный (редко) пуск. Сопротивление пускового реактора выбирают, исходя из заданного соотношения пусковых токов

$$\frac{I_{\text{пуск. и}}}{I_{\text{пуск. е}}} = \frac{U_{\text{и}}}{U_{\text{н}}} = \alpha, \qquad (4.7)$$

где $U_{\text{и}}$ — напряжение на двигателе при пуске по искусственной характеристике;

$U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение двигателя;

$I_{\text{пуск. и}}$ и $I_{\text{пуск. е}}$ — пусковые токи двигателя при пуске по искусственной и естественной механическим характеристикам соответственно.

При этом индуктивное сопротивление пускового реактора может быть определено с учетом (3.64) по формуле

$$x_р = \sqrt{\left(\frac{z_к}{\alpha}\right)^2 - r_к^2} - x_к, \tag{4.8}$$

где

$$z_к = \frac{U_н}{\sqrt{3} \cdot I_{пуск.\,е}}.$$

Если $r_к$ неизвестно, то его принимают равным нулю, и тогда при $x_к = z_к$ выражение (4.8) принимает вид

$$x_р = z_к\left(\frac{1}{\alpha} - 1\right). \tag{4.9}$$

Зная сопротивление реактора $x_р$, можно перейти к расчету искусственной механической характеристики по выражению (4.1), предварительно определив [4-2] величины $m_{м.\,и}$ и $s_{к.\,и}$ из выражений

$$m_{м.\,и} = m_{м.\,е}\frac{x_к}{x_к + x_р} \tag{4.10}$$

и

$$s_{к.\,и} = s_{к.\,е}\frac{x_к}{x_к + x_р}. \tag{4.11}$$

При этом формула для расчета искусственной механической характеристики с учетом (4.1) принимает вид

$$m_и = m_{м.\,и}\frac{2}{\dfrac{s}{s_{к.\,и}} + \dfrac{s_{к.\,и}}{s}}. \tag{4.12}$$

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОДСТАНЦИИ ПРИ РЕАКТОРНОМ ПУСКЕ МАШИН

Схема питания и соответствующая схема замещения для расчета напряжений в момент реакторного пуска компенсатора представлена на рис. 4-7. Для простоты полные сопротивления схемы заменены их индуктивными составляющими. Все сопротивления на схеме замещения отнесены к мощности трансформатора и выражены в относительных единицах.

Если напряжение сети U' привести к обмотке низшего напряжения трансформатора, то напряжение U на этой обмотке в момент пуска можно определить из равенства токов

$$\frac{U'}{x + x_{Тр} + \dfrac{x_н(x_р + x_{с.\,к})}{x_н + (x_р + x_{с.\,к})}} = \frac{U}{\dfrac{x_н(x_р + x_{с.\,к})}{x_н + (x_р + x_{с.\,к})}},$$

где U' — напряжение сети, питающейся от источника неограниченной мощности, принимаемое неизменным;

x — реактивное сопротивление сети;
$x_{\text{Тр}}$ — реактивное сопротивление трансформатора;
$x_{\text{н}}$ — реактивное сопротивление нагрузки;
$x_{\text{р}}$ — реактивность пускового реактора;
$x_{\text{с. к}}$ — реактивность синхронного компенсатора.

После преобразования получаем

$$U = \frac{U' x_{\text{н}} (x_{\text{р}} + x_{\text{с. к}})}{x_{\text{н}} (x + x_{\text{Тр}} + x_{\text{р}} + x_{\text{с. к}}) + (x + x_{\text{Тр}})(x_{\text{р}} + x_{\text{с. к}})}. \quad (4.13)$$

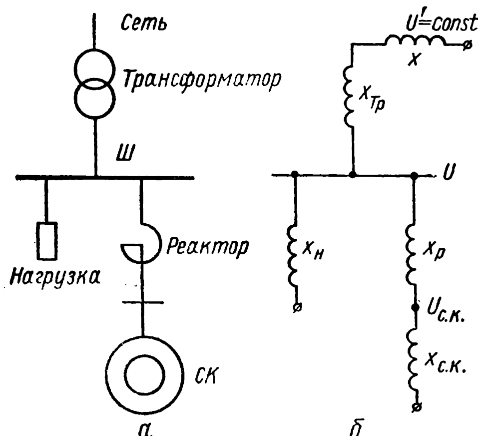


Рис. 4-7. Схема для расчета напряжений при реакторном пуске компенсатора:
а — схема питания; *б* — схема замещения.

При отсутствии нагрузки на шинах подстанции напряжение U на этих шинах получим, положив в уравнении (4.13) сопротивление нагрузки $x_{\text{н}}$ равным бесконечности. При этом, раскрывая неопределенность путем дифференцирования числителя и знаменателя по $x_{\text{н}}$, находим

$$U = \frac{U' (x_{\text{р}} + x_{\text{с. к}})}{x + x_{\text{Тр}} + x_{\text{р}} + x_{\text{с. к}}}. \quad (4.14)$$

Напряжение $U_{\text{с. к.}}$ на зажимах синхронного компенсатора в момент пуска можно определить из равенства токов

$$\frac{U}{x_{\text{р}} + x_{\text{с. к}}} = \frac{U_{\text{с. к}}}{x_{\text{с. к}}},$$

откуда

$$U_{\text{с. к}} = \frac{U x_{\text{с. к}}}{x_{\text{р}} + x_{\text{с. к}}}. \quad (4.15)$$

Выбранный реактор должен проверяться по условию обеспечения на зажимах машины в момент пуска некоторого минимального напряжения, достаточного для трогания машины с места. Это условие может быть проверено [4-4] с помощью соотношения

$$\frac{U_{\text{мин. тр}}}{U_{\text{н}}} = \sqrt{\frac{m_{\text{о}}}{m_{\text{пуск}}}},$$

или

$$U_{\text{мин. тр}} = U_{\text{н}} \sqrt{\frac{m_{\text{с}}}{m_{\text{пуск}}}}, \quad (4.16)$$

где $U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение синхронной машины;
$U_{\text{мин. тр}}$ — минимальное напряжение на зажимах машины, необходимое для трогания ее с места;
$m_{\text{пуск}}$ — начальный пусковой вращающий момент машины;

$m_с$ — момент сопротивления на валу машины в начальный момент пуска, определяемый характером приводимого в движение механизма.

В случае синхронных компенсаторов момент сопротивления может быть принят равным $m_с \approx 0{,}05$. При этом, обозначая $U_{мин.\,тр}$ через $U_{с.\,к.\,тр}$, уравнение (4.16) принимает вид

$$U_{с.\,к.\,тр} = U_н \sqrt{\frac{0{,}05}{m_{пуск}}}. \qquad (4.17)$$

Для трогания компенсатора с места необходимо, чтобы удовлетворялось условие

$$U_{с.\,к} \geqslant U_{в.\,.\,тр}. \qquad (4.18)$$

Пусковой реактор во время пуска машины должен также поддерживать на шинах подстанции напряжение, достаточное для нормальной работы потребителей, подключенных к шинам. Допустимое при этом снижение напряжения определяется характером нагрузки (силовая нагрузка, силовая и осветительная).

При питании от общих шин подстанции силовой и осветительной нагрузок допускать снижение напряжения на шинах ниже 0,85—0,9 от номинального не рекомендуется. При питании от шин только силовой нагрузки снижение напряжения при пуске допустимо до такого его значения, при котором эта нагрузка сохраняется.

СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РЕАКТОРНОМ ПУСКЕ

Различают «легкий» и «тяжелый» пуск двигателей.

Легкий пуск — это пуск двигателей вхолостую или с малым моментом сопротивления на валу, с подачей возбуждения и вхождением двигателя в синхронизм при пониженном напряжении на статоре, т.е. при еще включенном пусковом реакторе в цепи статора. Процесс пуска заканчивается шунтированием пускового реактора. Так пускаются, например, насосы с закрытой задвижкой, мотор-генераторы и т.п.

Тяжелый пуск — это пуск двигателей с большим моментом сопротивления на валу, с подачей возбуждения и вхождением двигателя в синхронизм при полном напряжении на статоре, т.е. при уже зашунтированном пусковом реакторе. Процесс пуска заканчивается подачей возбуждения на ротор двигателя (при подсинхронной скорости вращения) и вхождением его в синхронизм. Так пускаются, например, насосы с соткрытой задвижкой, землесосы и т.п.

Принципиальная схема управления высоковольтным синхронным двигателем при реакторном пуске [412] представлена на рис. 4-8. Питание двигателя предусмотрено через разъединитель 1Р и два выключателя — линейный Л и ускорения У — с ручным приводом, позволяющим производить включение и отключение двигателя как от руки, так и его автоматическое отключение.

Питание соленоидов включения $Л_в$ и $У_в$, потребляющих большой ток, предусмотрено от отдельных шин источника постоянного тока (рис. 4-8, *г*). Другая аппаратура управления и цепи защиты также питаются раздельно от источника оперативного постоянного тока.

Управление возбуждением двигателя осуществляется при помощи реле подачи возбуждения РПВ, воздействующего на контактор *М*

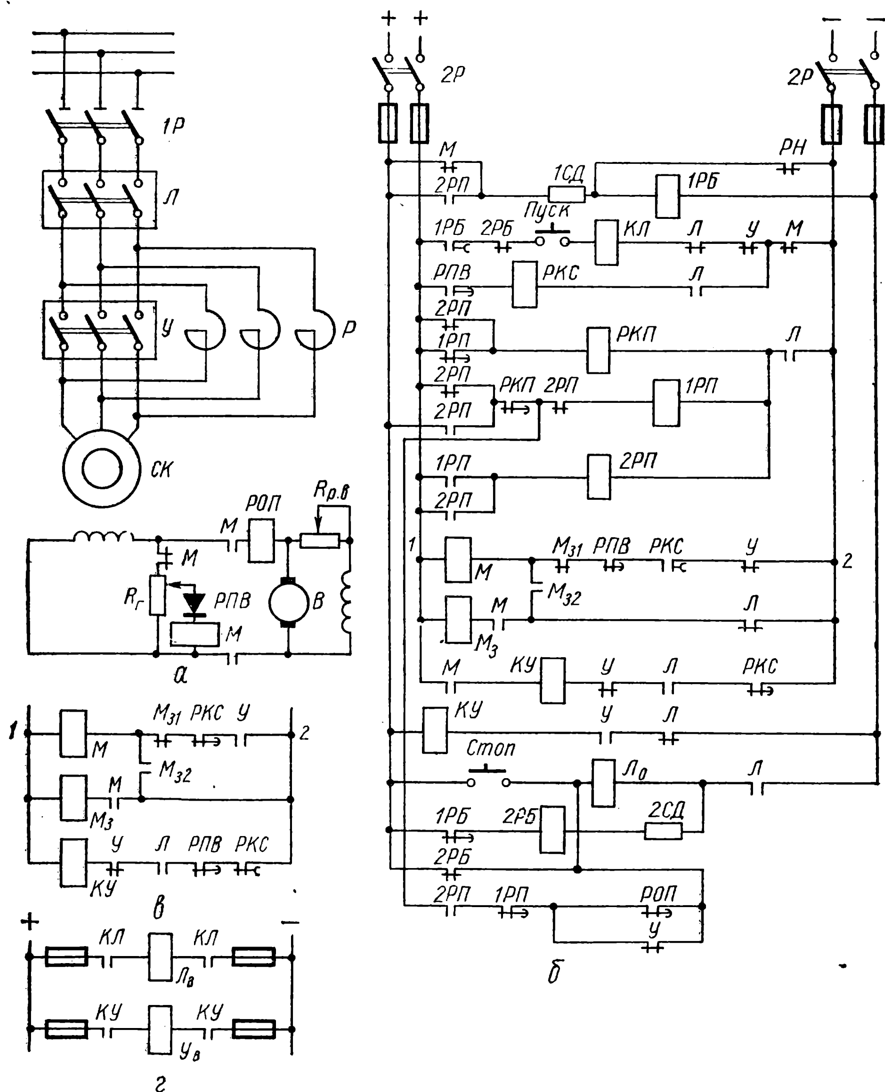


Рис. 4-8. Принципиальная схема управления синхронным двигателем при реакторном пуске:

а — схема силовой цепи; *б* — схема управления; *в* — узел схемы, применяемый при тяжелом пуске; *г* — схема питания соленоидов включения $Л_В$ и $У_В$, потребляющих большой ток.

(рис. 4-8, *б*), который имеет две катушки: включающую *М* и отключающую $М_з$. После включения якорь контактора *М* механически запирается защелкой и остается во включенном положении до тех пор, пока защелка не будет отведена отключающей катушкой $М_з$. Это произойдет лишь после отключения двигателя, когда нормально замкнутый блок-контакт выключателя Л замкнется и будет подано питание на катушку $М_з$, которая оттянет механическую защелку. При этом контактор *М* отключит возбудитель и замкнет обмотку возбуждения двигателя на гасильное сопротивление $R_г$ (рис. 4-8 *а*).

Реле напряжения РН (на схеме не показано) контролирует наличие и уровень напряжения силовых цепей и при нормальном напряжении размыкает свой контакт, дешунтируя этим обмотку блокировочного реле 1РБ. Это реле контролирует также напряжение цепей защиты и подготавливает цепи пуска двигателя. При нормальном напряжении силовой и оперативных цепей реле 1РБ замыкает свой контакт в цепи обмотки линейного контактора КЛ и кнопки «Пуск». Двигатель подготовлен к пуску.

Легкий пуск. Пти нажатии кнопки «Пуск» подводится напряжение к катушке контактора КЛ, который срабатывает и включает катушку соленоида включения $Л_в$ линейного выключателя Л. В результате выключатель Л включается, на статор двигателя через реактор Р подается пониженное напряжение и двигатель разворачивается. Реле подачи возбуждения РПВ, оказавшись под напряжением, срабатывает, размыкает свой нормально замкнутый контакт в цепи *1 —2* включающей катушки контактора *М* и замыкает нормально разомкнутый контакт в цепи реле контроля синхронизации РКС. Последнее срабатывает, замыкает свой нормально разомкнутый контакт в цепи включающей катушки контактора *М*, подготавливая его к включению, и размыкает нормально замкнутый контакт в цепи катушки контактора КУ, предотвращая преждевременное включение соленоида $У_в$, а следовательно, и выключателя ускорения У, шунтирующего реактор.

При достижении двигателем подсинхронной скорости вращения реле РПВ отпадает, разомкнет цепь питания реле РКС и замкнет цепь питания включающей катушки контактора *М* через неразомкнувшийся еще контакт РКС, имеющий замедление на размыкание. Получив питание, контактор *М* размыкает цепь гасильного сопротивления и замыкает свои нормально разомкнутые контакты в цепи питания обмотки ротора двигателя, подключая последнюю к возбудителю, а также замыкает свой нормально разомкнутый контакт в цепи контактора КУ. По истечении замедления контакт реле РКС разомкнется, но контактор *М* будет удерживаться во включенном положении с помощью механической защелки.

После подачи возбуждения и замыкания контакта *М* в цепи контактора КУ замыкается с выдержкой времени контакт реле РКС и подводится напряжение на контактор КУ. В результате срабатывает соленоид $У_в$ (рис. 4-8, *г*) и включает выключатель ускорения У, шунтирующий реактор. На двигатель подано полное напряжение и его пуск окончен.

Тяжелый пуск. При тяжелом пуске последовательность включения обмоток двигателя другая. Здесь также на обмотку статора через реактор подается сначала пониженное напряжение. Но потом на статор подается полное напряжение и при подсинхронной скорости включается возбуждение ротора.

Таким образом, различие получается в очередности подачи возбуждения на ротор и подаче полного напряжения на статор. Поэтому управление пуском двигателя при тяжелом пуске можно осуществить по той же схеме, что и при легком пуске, но с заменой узла схемы начиная со строчки *1—2* (рис. 4-8, *б*) схемой рис. 4-8 *в*. Тогда при подсинхронной скорости реле РПВ размыкает цепь питания реле РКС и через еще не разомкнувшийся контакт реле РКС (рис. 4-8, *в*) замыкает цепь контактора КУ. В результате этого соленоид включения $У_в$ включит выключатель ускорения У и на статор двигателя будет подано полное напряжение.

По истечении замедления закроется контакт реле РКС и на контактор *М* будет подано питание. Последний сработает, подаст возбуждение на ротор двигателя, и он втянется в синхронизм.

Практически переход от схемы легкого к схеме тяжелого пуска достигается путем престановки соответствующих перемычек на поставляемой заводом станции управления синхронным двигателем.

Останов двигателя. Останов осуществляется путем нажатия кнопки «Стоп» в цепи соленоида отключения $Л_о$ линейного выключателя Л. При этом выключатель Л отключается и замыкается его блок-контакт *Л* в цепи катушки $М_з$, которая отключает защелку контактора *М*. Последний отключает возбудитель и замыкает обмотку ротора двигателя на гасильное сопротивление $R_г$, подготовив двигаталь к пуску.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕСИНХРОНИЗАЦИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В практике эксплуатации могут возникать кратковременные снижения напряжения, а также другие преходящие явления (работа устройств системной автоматики и т.п.), по причине которых синхронные двигатели могут выпадать из синхронизма. Поэтому в схемах автоматики управления двигателями ответственного назначения предусматривается специальное устройство автоматической ресинхронизации. При выпадении двигателя из синхронизма это устройство переводит его в асинхронный режим, при котором он снова может втянуться в синхронизм.

Автоматическая ресинхронизация может быть выполнена по схеме рис. 4-9. В дополнение к основной пусковой аппаратуре в цепи ротора двигателя включен добавочный реактор РД, к зажимам которого подключены параллельно реле контроля синхронизма РКС и реле РТТ тепловой защиты ротора. Обмотка реле РКС замыкается контактами реле времени РВ в конце процесса пуска.

При синхронной работе двигателя сопротивление реактора РД практически не сказывается, поскольку он выбирается с малым активным сопротивлением и большим реактивным. При выходе двигателя

из синхронизма в цепи ротора возникают переменный ток и падение напряжения на реакторе, пропорциональные частоте скольжения. Под действием этого падения напряжения срабатывает реле РКС, что ведет к срабатыванию контактора *М*, который переключит цепь ротора двигателя на асинхронный режим путем включения обмотки возбуждения двигателя ОВД на разрядное сопротивление $R_г$ и отключения возбудителя В.

Если причина, вызвавшая выпадение двигателя из синхронизма, вскоре исчезнет, его ротор снова достигнет подсинхронной скорости и, как и при пуске двигателя, сработает реле подачи возбуждения РПВ, что приведет к срабатыванию контактора *М* устройства автоматического гашения поля АГП и переключению цепи ротора на синхронный режим. В противном случае, во избежание опасного перегрева обмотки ротора, срабатывает тепловое реле РТТ и отключает двигатель от сети.

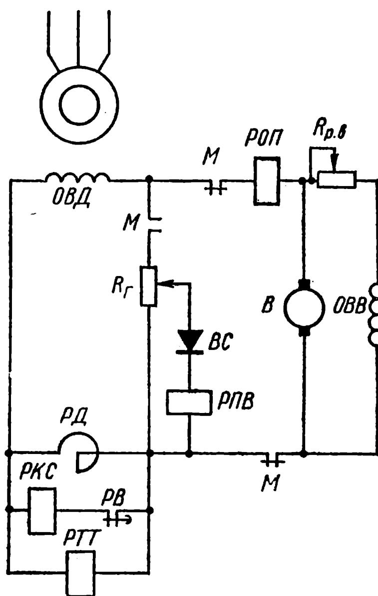


Рис. 4-9. Схема ресинхронизации синхронного двигателя.

СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ ПРИ РЕАКТОРНОМ ПУСКЕ

Условия пуска для синхронных компенсаторов обычно легче, чем для синхронных двигателей, поскольку у них момент сопротивления на валу отсутствует, если не учитывать сопротивления трения в подшипниках и о воздух.

В качестве принципиальной схемы автоматического управления реакторным пуском синхронного компенсатора может быть рассмотрена проверенная практикой схема, показанная на рис. 4-10 и 4-11, разработанная ВНИИэлектропривод для синхронных компенсаторов мощностью 3,5—30 тыс. кВА [4-5].

На схеме силовых цепей (рис. 4-10) контакты *М* устройства АГП показаны для отключенного его положения, т. е. сопротивление гашения $R_г$ введено, что соответствует случаю аварийного отключения компенсатора защитой. При нормальном отключении компенсатора, как и при нормальной его работе, якорь возбудителя остается подключенным к ротору компенсатора, устройство АГП остается включенным, т.е. сопротивление $R_г$ выведено.

Последовательность операций при пуске и останове компенсатора можно проследить по схеме управления (рис. 4-11).

П у с к к о м п е н с а т о р а. Наличие напряжения на шинах оперативного постоянного тока контролируется с помощью реле конт-

роля напряжения РКН и, например, зеленой лампы ЛЗ. Перед пуском компенсатора выключатели 1В и 2В (рис. 4-10) отключены, что контролируется положением их блок-контактов $1В_1$ и $1В_2$ (рис. 4-11), которые в этом случае замкнуты. Контакты защиты от внутренних повреждений $РЗ_1$, а также контакты реле останова $РО_1$ при этом также замкнуты, и готовность компенсатора к пуску сигнализируется белой лампой ЛБ.

Пуск компенсатора производится одним командным импульсом,

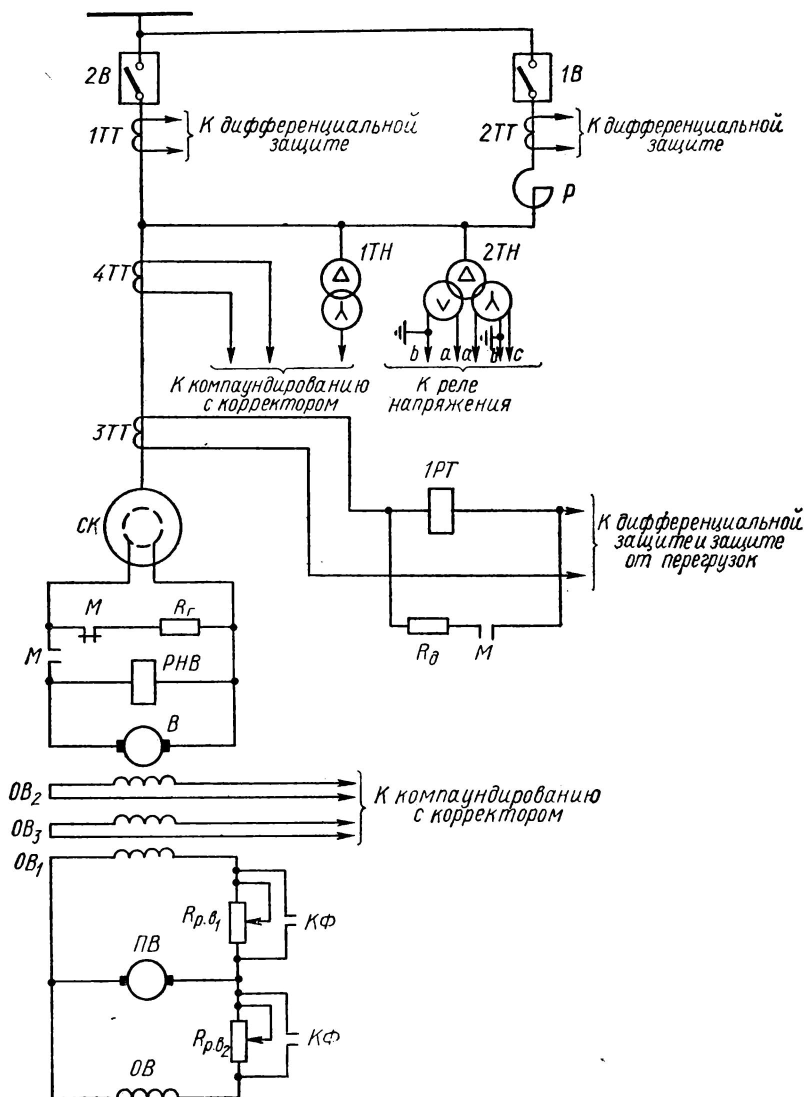


Рис. 4-10. Силовые цепи схемы управления реакторным пуском компенсатора.

включающим реле пуска РП. Этот импульс может быть подан либо непосредственно с командного устройства компенсатора при включении ключа управления, показанного условно кнопкой «Пуск» (рис. 4-11), либо дистанционно с главного щита управления подстанции, либо же телемеханически с диспетчерского пункта (цепи дистанционного и телемеханического пусков на схеме не показаны).

При замыкании кнопки «Пуск» замыкается цепь обмотки пускового реле РП, при срабатывании которого контактом $РП_1$ оно самоудерживается, контактом $РП_2$ замыкается цепь включающей обмотки электромагнитного вентиля смазки ЭМВС (вкл.), контактом $РП_3$ подготавливается цепь питания контактора включения $КВ_{1в}$ выключателя 1В, контактом $РП_4$ размыкается цепь реле останова РО, контактом $РП_5$ замыкается цепь питания включающей катушки контактора *М* и устройства АГП, контактом $РП_6$ замыкается цепь контактора пуска электродвигателя задвижки водопровода системы охлаждения компенсатора.

При установившейся нормальной циркуляции охлаждающей воды и масла замыкаются контакты соответствующих струйных реле движения жидкости РСВ и РСМ и подается питание на реле контроля охлаждения и смазки РКОС. Последнее срабатывает и замыкает цепь питания контактора включения $КВ_{1в}$, который срабатывает и через соленоид включения $СВ_{1в}$ включает выключатель 1В (рис. 4-10). При этом размыкается блок-контакт $1В_1$ этого выключателя и пусковое реле РП после некоторой задержки отпадает.

При включении выключателя 1В возникает пусковой ток, под воздействием которого срабатывает и замыкает свои контакты реле контроля ускорения 1РТ, а затем реле 1РП. На контактах $1РП_1$ замыкается цепь обмотки реле 2РП и контактора ККВ, отключающего систему компаундирования и корректора возбуждения, если это предусмотрено по условиям пуска. Реле 2РП срабатывает и контактами $2РП_1$ подготавливает цепь питания контактора $КВ_{2в}$ выключателя 2В, но контактор этот пока что включиться не может, поскольку разомкнулся в его цепи контакт $1РП_2$ реле 1РП.

По мере нарастания оборотов компенсатора напряжение на якоре его возбудителя нарастает и увеличивается ток возбуждения в цепи ротора. Ток в цепи статора при этом уменьшается; при его снижении до значения, равного примерно $2I_н$, якорь реле 1РТ отпадает и его контакты размыкают цепь обмотки 1РП. Между тем компенсатор входит в синхронизм, и включается система компаундирования и коррекции напряжения, если до этого она была отключена.

Потеряв питание, якорь реле 1РП после некоторой задержки отпадает и контактом $1РП_1$ размыкает цепь обмотки реле 2РП, а контактом $1РП_2$ замыкает цепь включения контактора $КВ_{2в}$. К моменту замыкания контакта $1РП_2$ контакт $2РП_1$ остается еще в замкнутом состоянии, поскольку время задержки при отпадании якоря у реле 2РП больше, чем у реле 1РП. Поэтому цепь питания контактора $КВ_{2В}$ будет замкнутой, он сработает и через соленоид включения $СВ_{2В}$ включит выключатель 2В, шунтирующий пусковой реактор Р (рис. 4-10).

При включении выключателя 2В замыкается его блок-контакт $2В_2$ в цепи соленоида $СО_{1В}$ и выключатель 1В отключается. Кроме того, на контактах $2В_4$ подготавливается цепь питания обмотки реле фор-

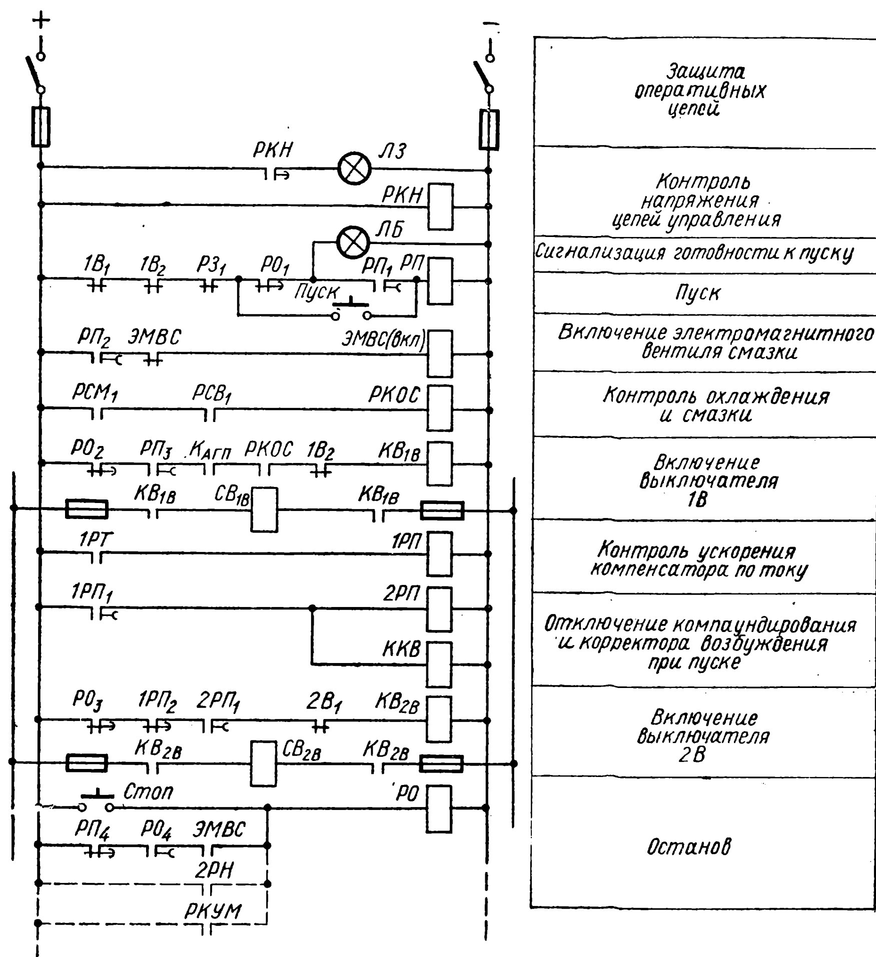


Рис. 4-11. Схема автоматического управления

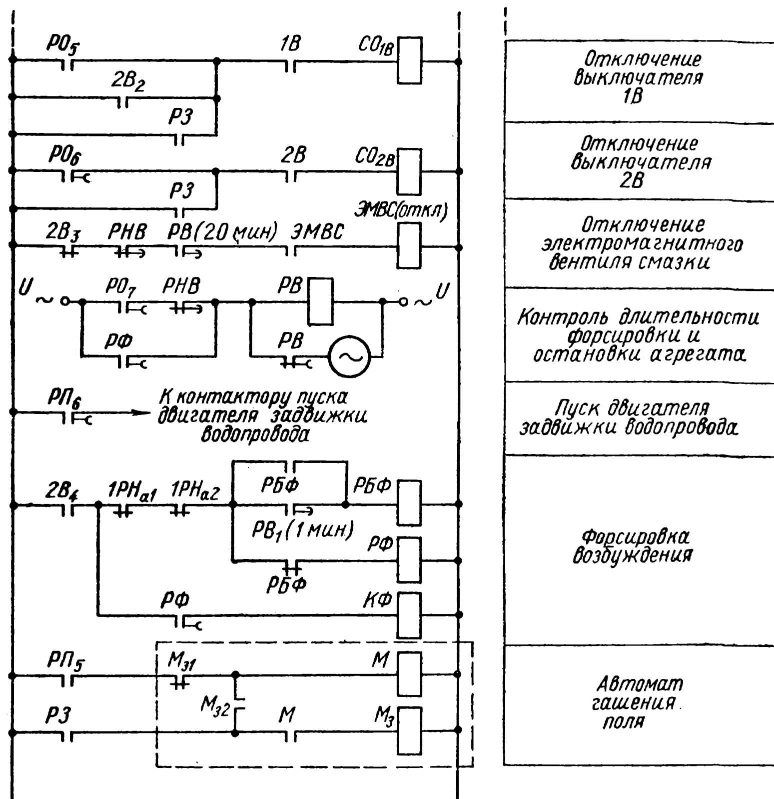
сировки возбуждения РФ. При сниженном напряжении реле минимального напряжения держат свои контакты $1РН_{а1}$ и $1РН_{а2}$ (рис. 4-11) замкнутыми, реле РФ срабатывает и через контакт форсировки КФ закорачивает сопротивления $R_{р.в1}$ и $R_{р.в2}$ в цепях возбудителя и подвозбудителя (рис. 4-10).

При восстановлении нормального напряжения на зажимах компенсатора, а также по истечении времени нормального пуска или длительности допустимой форсировки возбуждения, определяемой временем замыкания контактов $РВ_1$, реле форсировки РФ теряет питание, кон-

тактор форсировки КФ обесточивается и сопротивления $R_{р.в1}$ и $R_{р.в2}$ в цепях возбуждения дешунтируются.

Процесс пуска на этом заканчивается и синхронный компенсатор работает на сеть.

Останов компенсатора. Останов компенсатора производится также одним командным импульсом. Останов может быть как нормальным, так и аварийным. При нормальном останове командный импульс может быть подан на реле останова РО либо непосредственно ключом управления, условно показанным кнопкой «Стоп» (рис. 4-11), либо от реле минимального напряжения 2РН с выдержкой времени



реакторным пуском синхронного компенсатора.

порядка 10 с, включенного на трансформатор напряжения 2ТН (рис. 4-10), либо от реле контроля уровня масла РКУМ, если его действие также принято на отключение (подстанция без постоянного дежурного персонала). Кроме того, командный импульс на останов компенсатора может быть подан дистанционно с главного щита управления подстанции, а также средствами телемеханики с диспетчерского пункта системы (на схеме цепи не показаны)

Получив командный импульс, реле РО срабатывает и контактом $РО_1$ размыкает цепь питания реле пуска РП, контактами $РО_2$ и $РО_3$ размыкает цепи контакторов включения $КВ_{1В}$ и $КВ_{2В}$ выключателей 1В и 2В, контактом $РО_4$ самоудерживается, контактами $РО_5$ и $РО_6$ замыкает цепи соленоидов отключения $СО_{1В}$ и $СО_{2В}$ выключателей 1В и 2В и контактом $РО_7$ подготавливает цепь питания обмотки реле времени двигательного типа РВ. При этом происходит отключение выключателей 1В и 2В. Спустя примерно 20 мин, равных выдержке времени реле РВ, через замкнувшиеся к этому времени контакты реле напряжения возбудителя РНВ подается питание на катушку отключения электромагнитного вентиля смазки ЭМВС (откл.), и смазка подшипников прекращается.

На этом останов компенсатора в нормальных условиях заканчивается.

В аварийных условиях отключение выключателей 1В и 2В происходит после замыкания контактов РЗ защиты от внутренних повреждений.

Пример. *Дано*: синхронный компенсатор СК мощностью $S_н = 15\,000$ кВА; $U_н = 6600$ В; $I_н = 1310$ А; $n = 1000$ об/мин; $I_{пуск.\,е} = 5,85\,I_н$; $m_{пуск} = \frac{M_{пуск}}{M_н} = 1,4$; $m_{вх} = \frac{M_{вх}}{M_н} = 1,4$; $m_с = 0,05$; $x''_d = 0,2$; момент инерции ротора компенсатора $J = 3750$ кг м².

Требуется: 1. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику.

2. Выбрать реактор, обеспечивающий снижение пускового тока до значения $I_{пуск.\,и} = 2,4\,I_н$.

3. Рассчитать и построить искусственную механическую характеристику при пуске СК через реактор, т. е. при сниженном напряжении.

4. Рассчитать время разворота СК при реакторном пуске.

5. Проверить возможность реакторного пуска компенсатора от трансформатора мощностью 60000 кВА; 110/6,6 кВ; $x_{Тр} = 10,5\%$ при условии, что напряжение на шинах равно 109 кВ; устройство регулирования напряжения установлено в положение 112 кВ; сопротивление сети, приведенное к обмотке низшего напряжения трансформатора, равно $x = 0,01$ (рис. 4-7); нагрузка на шинах 6 кВ отсутствует.

6. Составить принципиальную схему автоматического управления синхронным компенсатором.

Решение. 1. Для расчета естественной механической характеристики воспользуемся формулами (4.4), (4.5) и (4.6), получая при этом:

по (4.4)

$$s_{к.е} = \frac{\sqrt{\frac{m_{пуск}}{m_{вх}} - 0,05}}{\sqrt{20 - \frac{m_{пуск}}{m_{вх}}}} = \frac{\sqrt{\frac{1,4}{1,4} - 0,05}}{\sqrt{20 - \frac{1,4}{1,4}}} = 0,224;$$

по (4.5)

$$m_{м.е} = \frac{m_{пуск}}{2}\left(\frac{1}{s_{к.\,е}} + s_{к.\,е}\right) = \frac{1,4}{2}\left(\frac{1}{0,224} + 0,224\right) = 3,28;$$

по (4.6)

$$m_e = m_{м.е}\frac{2}{\frac{s}{s_{к.е}}+\frac{s_{к.е}}{s}} = \frac{2\cdot 3{,}28}{\frac{s}{0{,}224}+\frac{0{,}224}{s}} = \frac{6{,}56}{\frac{s}{0{,}224}+\frac{0{,}224}{s}}.$$

Задаваясь текущими значениями скольжения от $s=1$ до $s=0$, получим соответствующие значения моментов на естественной механической характеристике:

s	1	0,8	0,6	0,4	0,224	0,1	0,05	0,0
m_e	1,4	1,70	2,15	2,80	3,28	2,42	1,4	0,0
$m_и$	0,25	0,30	0,40	0,59	0,95	1,35	1,13	0,0

По этим данным строим кривую $s=f(m_e)$ (рис. 4-12).

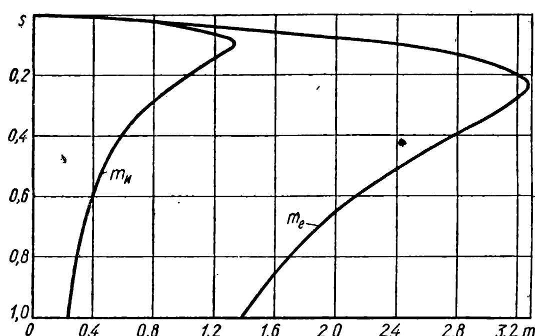


Рис. 4-12. Естественная и искусственная механические характеристики синхронного компенсатора (к примеру расчета).

2. Определяем индуктивное сопротивление реактора исходя из заданного снижения пускового тока компенсатора (4.7), т. е. из условия

$$\alpha = \frac{I_{пуск.п}}{I_{пуск.е}} = \frac{2{,}4}{5{,}85} = 0{,}41.$$

Сопротивление синхронного компенсатора при пуске ($s=1$) при номинальном напряжении

$$z_к = \frac{U_н}{\sqrt{3}\cdot I_{пуск.е}} = \frac{6600}{\sqrt{3}\cdot 5{,}85\cdot 1310} = 0{,}498\ \text{Ом}.$$

Тогда индуктивное сопротивление реактора по упрощенной формуле (4.9) при $\alpha=0{,}41$ будет

$$x_р = z_к\left(\frac{1}{\alpha}-1\right) = 0{,}498\left(\frac{1}{0{,}41}-1\right) = 0{,}72\ \text{Ом}.$$

Относя сопротивление реактора к номинальной мощности синхронного компенсатора СК или к номинальному сопротивлению СК, получим

$$x_{*р} = x_р\frac{S_н}{U_н^2} = 0{,}72\frac{15}{6{,}6^2} = 0{,}248,$$

или

$$x_{*р} = \frac{x_р}{z_н} = x_р \frac{\sqrt{3} I_н}{U_н} = 0{,}72 \frac{\sqrt{3} \cdot 1310}{6600} = 0{,}248.$$

Номинальный ток бетонного реактора воздушного охлаждения можно принять [4-4] равным $0{,}2 I_н$ компенсатора, т. е.

$$I_{н.р} \cong 0{,}2 \cdot I_н = 0{,}2 \cdot 1310 = 262 \text{ А} \cong 300 \text{ А}.$$

Тогда сопротивление реактора, отнесенное к его номинальному току 300 А, будет

$$x_р\% = x_{*р} \frac{I_{н.р}}{I_н} 100 = 0{,}248 \frac{300}{1310} 100 = 5{,}7\%.$$

Принимаем по каталогу ближайший бетонный реактор на ток 300 А; 6,6 кВ; 6%.

3. Для определения искусственной механической характеристики предварительно по (4.10) и (4.11) определим выражения $m_{м.и}$ и $s_{к.и}$:

$$m_{м.и} = m_{м.е} \frac{x_к}{x_к + x_р} = 3{,}28 \frac{0{,}498}{0{,}498 + 0{,}72} = 3{,}28 \cdot 0{,}41 = 1{,}35$$

и

$$s_{к.и} = s_{к.е} \frac{x_к}{x_к + x_р} = 0{,}224 \frac{0{,}498}{0{,}498 + 0{,}72} = 0{,}224 \cdot 0{,}41 = 0{,}092.$$

Подставляя полученные величины в уравнение (4.12), получим расчетную формулу для искусственной механической характеристики при реакторном пуске:

$$m_и = m_{м.и} \frac{2}{\frac{s}{s_{к.и}} + \frac{s_{к.и}}{s}} = \frac{2 \cdot 1{,}35}{\frac{s}{0{,}092} + \frac{0{,}092}{s}}.$$

Задаваясь текущими значениями скольжения от $s = 1$ до $s = 0$, получаем соответствующие значения моментов на искусственной механической характеристике, сведенные в вышеприведенной таблице, и строим соответствующую кривую $s = f(m_и)$ (рис. 4-12).

4. Время разворота синхронного компенсатора определим с помощью уравнения (3.28), которое будем решать графоаналитическим путем. Время разворота при реакторном пуске можно определить либо непосредственно с помощью искусственной механической характеристики $m_и$, либо с помощью естественной механической характеристики $m_е$ (рис. 4-12) с последующим пересчетом по формуле (3.32).

Воспользуемся первым путем. При этом для удобства расчетов изобразим искусственную механическую характеристику повторно на рис. 4-13 и там же нанесем прямую момента сопротивления $m_с = 0{,}05$. Координату скольжения s разобьем на 10 равных частей и измерим средние ординаты соответствующих участков кривой. Тогда получим

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m - m_с} = -\left[\frac{\Delta s_1}{m_1} + \frac{\Delta s_2}{m_2} + \dots + \frac{\Delta s_{10}}{m_{10}}\right] = -0{,}1 \left[\frac{1}{0{,}21} + \frac{1}{0{,}23} + \frac{1}{0{,}27} + \frac{1}{0{,}31} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{0{,}39} + \frac{1}{0{,}48} + \frac{1}{0{,}62} + \frac{1}{0{,}84} + \frac{1}{1{,}20} + \frac{1}{0{,}92}\right] = -0{,}1 \cdot 25{,}43 = -2{,}54.$$

По формуле (3.31) находим механическую постоянную времени ротора компенсатора

$$T_j = 0{,}011\, J \frac{n^2}{S_н} = 0{,}011 \cdot 3750 \frac{1000^2}{15\,000\,000} = 2{,}75 \text{ с}.$$

Время разворота компенсатора при пуске через реактор, т. е. при сниженном напряжении, определим по формуле (3.28)

$$t = -T_j \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m_{изб}} = (-2{,}75) \cdot (-2{,}54) = 7 \text{ с.}$$

Отметим, что при расчете без учета механического момента сопротивления m_c время разворота компенсатора при пуске через тот же реактор получается $t = 6$ с.

5. Проверим возможность реакторного пуска компенсатора от заданного трансформатора. Номинальное напряжение выбранного реактора $U_{н.р} = 6{,}6$ кВ, номинальный ток 300 А, реактивность 6%. Напряжение в сети на стороне 6 кВ трансформатора в соответствии с исходными данными

$$U' = 6{,}6 \frac{109}{112} = 6{,}45 \text{ кВ.}$$

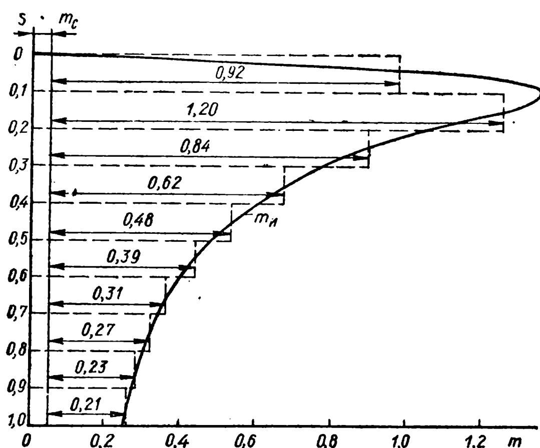


Рис. 4-13. Определение времени разворота синхронного компенсатора.

Сопротивление компенсатора, приведенное к номинальной мощности трансформатора и к напряжению на стороне 6 кВ трансформатора,

$$x_{с.к} = x''_d \frac{S_{Тр}}{S_н} \cdot \frac{U_н^2}{U'^2} = 0{,}2 \cdot \frac{60000}{15000} \cdot \left(\frac{6{,}6}{6{,}45}\right)^2 = 0{,}84.$$

Сопротивление реактора, приведенное к номинальной мощности трансформатора и к напряжению сети на стороне 6 кВ трансформатора,

$$x_р = 0{,}06 \frac{60000}{\sqrt{3} \cdot 6{,}6 \cdot 300} \left(\frac{6{,}6}{6{,}45}\right)^2 = 1{,}1.$$

Напряжение при пуске на шинах подстанции, к которым через реактор подключается компенсатор (рис. 4-7), находим по уравнению (4.14)

$$U = U' \frac{x_р + x_{с.к}}{x_1 + x_{Тр} + x_р + x_{с.к}} = 6{,}45 \frac{1{,}1 + 0{,}84}{0{,}01 + 0{,}105 + 1{,}1 + 0{,}84} = 6{,}1 \text{ кВ.}$$

Напряжение на зажимах компенсатора в момент пуска определится по формуле (4.15)

$$U_{с.к}=\frac{Ux_{с.к}}{x_р+x_{с.к}}=\frac{6{,}1\cdot 0{,}84}{1{,}1+0{,}84}=2{,}64\ кВ.$$

Минимальное напряжение на зажимах компенсатора, необходимое для трогания его с места, найдем по формуле (4.17)

$$U_{с.к.тр}=U_н\sqrt{\frac{0{,}05}{m_{пуск}}}=6600\sqrt{\frac{0{,}05}{1{,}4}}=1250\ В.$$

Поскольку в момент пуска напряжение на зажимах компенсатора $U_{с.к}=2640$ В, т. е. больше необходимого для трогания с места напряжения $U_{с.к.тр}=1250$ В, то условие (4.18) разворота компенсатора удовлетворяется.

Напряжение на шинах подстанции при пуске компенсатора снижается до значения $U=6100$ В, или до 92,5% номинального, т. е. незначительно.

Таким образом, пуск синхронного компенсатора 15000 кВА от трансформатора 60000 кВА с помощью реактора 300 А; 6,6 кВ; 6% вполне возможен. При этом время разворота компенсатора составляет 7 с.

6. Выбор схемы управления. В качестве схемы автоматического управления реакторным пуском синхронного компенсатора может быть принята проверенная практикой схема, показанная на рис. 4-10 и 4-11, разработанная ВНИИ электропривод с учетом работ «Теплоэлектропроекта» и ВНИИЭ для синхронных компенсаторов мощностью 3,5—30 тыс. кВА [4-5, 4-6].

ТИРИСТОРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В последнее время вместо электромашинных возбудителей синхронных двигателей начинают применять полупроводниковые. Последние характеризуются более высокой надежностью, а также высоким быстродействием, что очень важно при форсировках возбуждения синхронных двигателей в условиях ударных нагрузок и при падениях напряжения в питающей сети. Кроме того, полупроводниковые возбудители компактны, бесшумны и более дешевые. Преимущества полупроводникового возбуждения еще больше возросли с появлением управляемых полупроводниковых вентилей — тиристоров.

Для питания полупроводникового (тиристорного) возбудителя трехфазное переменное напряжение источника питания может быть выпрямлено либо по известной трехфазной схеме с нулевым выводом, либо по трехфазной мостовой схеме А. Н. Ларионова (рис. 4-14). Поскольку в мостовой схеме пульсация выпрямленного напряжения и тока получается, как у шестифазной, т. е. значительно меньше, чем в схеме с нулевым выводом, то ей и отдается предпочтение.

На рис. 4-14 приведена так называемая несимметричная схема, имеющая тиристоры $Т_1$ только в одном плече моста, а в другом — неуправляемые диоды $Д_1$. Такая схема более экономична и применяется в тех случаях, когда инверторный режим с отдачей энергии поля в сеть (в процессе быстрого восстановления возбуждения после его форсировки) не предусматривается [4-7]. Регулирование возбуждения осуществляется путем изменения угла открытия тиристоров $Т_1$ с помощью специального блока управления тиристорным возбудителем.

Трансформатор, питающий систему возбуждения, выбирается на вторичное напряжение, обеспечивающее форсировку, при которой при полностью открытых тиристорах моста напряжение на обмотке возбуждения было бы равно (1,5—3)-кратному номинальному. Форсировка по току выбирается до 1,5-кратного значения номинального тока возбуждения.

В схеме на рис. 4-14 диод Д и тиристор Т замещают контактор *М* с защелкой и переключением нормально разомкнутых и нормально замкнутого контактов (рис. 4-8). Схема управления тиристорами выполняется таким образом, что во время асинхронного пуска синхронного двигателя тиристоры T_1 в цепи моста закрыты, а тиристор Т в цепи разрядного сопротивления $R_г$ открыт и вместе с диодом Д создает цепь для протекания переменного тока, индуктированного в обмотке возбуждения. При достижении двигателем синхронной скорости тиристоры T_1 открываются, а тиристор Т закрывается, и двигатель входит в синхронизм.

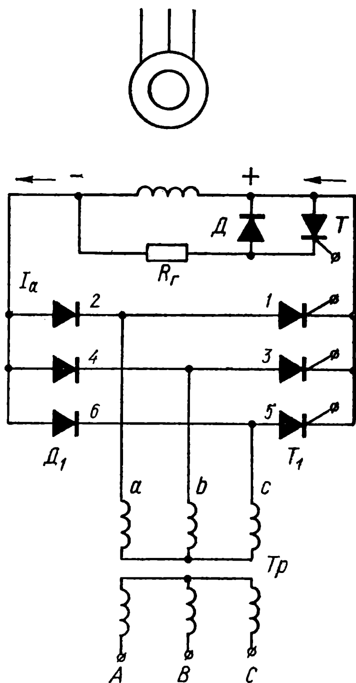


Рис. 4-14. Схема тиристорного возбуждения синхронного двигателя.

При полупроводниковом управлении разрядным сопротивлением $R_г$ пуск синхронного двигателя в асинхронном режиме получается проще и надежнее, чем при контакторном управлении. К тому же в схеме рис. 4-14 обмотка возбуждения всегда подключена через диод, чем обеспечивается надежная защита ее от перенапряжения.

Применительно к трехфазной мостовой схеме могут быть использованы следующие основные расчетные соотношения. Связь между выпрямленным напряжением и переменным напряжением вторичной обмотки трансформатора определяется [4-8, 4-9] уравнением

$$U_d = \sqrt{2}\,U_{л2}\frac{6}{\pi}\sin\frac{\pi}{6} = 1{,}35U_{л2} = 2{,}34U_2, \qquad (4.19)$$

где U_d — среднее значение выпрямленного напряжения;
$U_{л2}$ и U_2 — действующие значения соответственно линейного и фазного напряжений трансформатора.

Поскольку в непроводящую часть периода любой из вентилей присоединен через другой работающий вентиль к линейным зажимам трансформатора, то обратное напряжение на вентиле равно амплитуде линейного напряжения:

$$U_{обр} = \sqrt{2}\,U_{л2} = \sqrt{2}\frac{U_d}{1{,}35} = 1{,}045U_d. \qquad (4.20)$$

Среднее значение тока через вентиль

$$I_a = \frac{I_d}{3p}, \qquad (4.21)$$

где I_d — выпрямленный ток в нагрузке;

p — число параллельно соединенных вентилей в плече.

Максимальное значение тока через вентиль

$$I_{a\,\text{макс}} = I_{d\,\text{макс}} = I_d \frac{\frac{\pi}{6}}{\sin\frac{\pi}{6}} = 1{,}045 I_d = 3{,}14 I_a, \qquad (4.22)$$

т. е. в три с лишним раза превышает среднее значение этого тока.

Среднее значение выпрямленного тока I_d, полученное из (4.22) через максимально допустимое его значение $I_{d\,\text{макс}}$, будет

$$I_d = I_{d\,\text{макс}} \frac{6}{\pi} \sin\frac{\pi}{6} = 0{,}95 I_{d\,\text{макс}}. \qquad (4.23)$$

Ток во вторичной обмотке трансформатора, складывающийся в фазе a из токов в первом и втором вентилях (рис. 4-14), является чисто переменным током, действующее значение которого при пренебрежении пульсациями будет

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} I_d^2 \frac{4\pi}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}}\, I_d = 0{,}817 I_d. \qquad (4.24)$$

В данной схеме расчетная мощность обеих обмоток одинакова, поэтому равна им и расчетная мощность трансформатора

$$S_{\text{Тр}} = S_1 = S_2 = 3\sqrt{\frac{2}{3}}\, I_d \frac{U_d}{2{,}34} = 1{,}045 U_d I_d = 1{,}045 P_d. \qquad (4.25)$$

Пример. *Дано:* синхронный двигатель мощностью $P_н = 5000$ кВт, $U_н = 6$ кВ, $I_н = 550$ А, номинальный ток возбуждения $I_{в.\,н} = 285$ А, сопротивление обмотки возбуждения $r_р = 0{,}282$ Ом.

Требуется: 1. Выбрать схему тиристорного блока возбуждения двигателя.

2. Рассчитать тиристорное возбуждение, выбрать тип тиристоров и выпрямителей.

3. Выбрать трансформатор питания тиристорного возбудителя.

Решение. В качестве схемы тиристорного блока принимаем трехфазную несимметричную мостовую схему рис. 4-14, имеющую тиристоры только в одном плече. При прочих равных условиях несимметричная схема более предпочтительна по сравнению с симметричной по соображениям экономии тиристоров и большей надежности диодов.

Напряжение на обмотке ротора при номинальном токе возбуждения

$$U_{в.н} = I_{в.н} r_р = 285 \cdot 0{,}282 = 80{,}4 \text{ В}.$$

С другой стороны, для принятой трехфазной мостовой схемы среднее выпрямленное напряжение на нагрузке по (4.19)

$$U_d = 1{,}35 U_{л2}.$$

Приравнивая правые части полученных значений, найдем

$$1{,}35 U_{л2} = 80{,}4,$$

откуда необходимое линейное напряжение на входе схемы должно быть

$$U_{л2} = \frac{80,4}{1,35} = 59,5 \text{ В}.$$

Ток форсировки возбуждения принимаем полуторакратным, т. е.

$$I_{в.ф} = 1,5 I_{в.н} = 1,5 \cdot 285 = 428 \text{ А}.$$

Напряжение на обмотке возбуждения при токе форсировки

$$U_{в.ф} = I_{в.ф} r_р = 428 \cdot 0,282 = 120 \text{ В}.$$

Для получения этого напряжения линейное напряжение на вторичной обмотке питающего трансформатора с учетом (4.19) должно быть

$$U_{л.ф} = \frac{U_{в.ф}}{1,35} = \frac{120}{1,35} = 90 \text{ В}.$$

В случае ограничения скорости нарастания тока в силовой цепи тиристоров с помощью дросселей, включаемых последовательно с тиристорами (на схеме не показано), следует учесть падение напряжения на дросселе порядка 6%, а также и коммутационное падение напряжения порядка 5%. Тогда расчетное линейное напряжение трансформатора

$$U'_{л2} = 1,05 \cdot 1,06 \cdot U_{л.ф} = 1,05 \cdot 1,06 \cdot 90 = 100 \text{ В},$$

а обратное напряжение на вентиле по (4.20)

$$U_{обр} = \sqrt{2} U'_{л2} = \sqrt{2} \cdot 100 = 141 \text{ В}.$$

Задаваясь одним элементом в плече ($p = 1$), по (4.21) среднее значение тока через вентиль с учетом тока форсировки будет

$$I_а = \frac{I_{в.ф}}{3} = \frac{428}{3} = 143 \text{ А},$$

где $I_{в.ф}$ — выпрямленный ток в нагрузке с учетом форсировки.

Выбираем [4-10] тиристоры типа ВКДУ-150 на допустимый ток $I_а = 150$ А, а также диоды типа ВКД-200 по одному в каждом плече моста.

Максимальное значение тока через вентиль по (4.22)

$$I_{a макс} = I_{d макс} = 3,14 I_a = 3,14 \cdot 150 = 470 \text{ А}.$$

Среднее значение выпрямленного тока в соответствии с максимальным его значением получим по (4.23):

$$I_d = 0,95\, I_{d макс} = 0,95 \cdot 470 = 446 \text{ А}.$$

Сравнивая это значение тока с током форсировки, видим, что при выбранных параметрах тиристоров параллельное их включение не требуется.

Выбираем силовой трансформатор, питающий обмотку возбуждения. Действующее значение тока во вторичных обмотках трансформатора при соединении их в звезду по (4.24) будет

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0,817 \cdot 446 = 364 \text{ А}.$$

При этом форсировка по току была учтена при определении тока

$$I_d (I_{d макс}, I_а, I_{в.ф}).$$

Расчетная мощность силового трансформатора может быть определена через действующие значения напряжения и тока по формуле

$$S_{Tp} = \sqrt{3} U_л I_л = \sqrt{3} U_{л2} I_2 = \sqrt{3} \cdot 59,5 \cdot 364 = 37,4 \text{ кВА}.$$

Это же значение можно получить и через выпрямленные значения напряжения и тока в нагрузке по (4.25), т. е.

$$S_{Tp} = 1,045 U_d I_d = 1,045 \cdot U_{в.н} I_d = 1,045 \cdot 80,4 \quad 446 = 37,4 \text{ кВА}.$$

Выбираем трансформатор типа ТМ-50 на ближайшую большую мощность 50 кВА, на напряжение 6000/400 В. Первичная обмотка может остаться без изменения, а вторичная должна быть перемотана на линейное напряжение $U'_{л2} = 100$ В и линейный ток $I_2 = 364$ А. При перемотке может быть выбрана группа соединения 12 — звезда-звезда с выведенным нулем. Нулевой провод может потребоваться для улучшения характеристик тиристорного блока [4-11].

Глава пятая

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ НЕОТКЛЮЧАЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО УСЛОВИЯМ САМОЗАПУСКА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Самозапуск асинхронных двигателей заключается, как известно, в том, что двигатели, снизившие свои обороты вследствие короткого замыкания в сети или при кратковременном исчезновении напряжения, не отключаются и при восстановлении напряжения автоматически самозапускаются, разворачиваясь снова до нормальных оборотов. При этом считают, что самозапуск вполне допустим не только для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, но и для двигателей с фазным ротором с выведенными пусковыми устройствами [5-1].

Самозапуск двигателей имеет особенно большое значение для потребителей, не допускающих перерывов в электроснабжении. К таким потребителям относятся также и все ответственные механизмы собственного расхода электрических станций, приведенные в справочной литературе. В СССР путем самозапуска электродвигателей значительно повышена надежность работы механизмов собственного расхода электростанций.

При снижениях напряжения, обусловленных, например, короткими замыканиями в сети, число оборотов двигателей снижается и их сопротивление резко падает. Поэтому при восстановлении напряжения пусковые токи двигателей увеличиваются и обусловливают дополнительные потери напряжения в сопротивлениях, включенных между двигателями и источником питания. Восстанавливающееся на зажимах двигателей напряжение может оказаться при этом меньше необходимого для их разворота до нормальных оборотов. В результате самозапуск двигателей может оказаться обеспечен не для всех двигателей, а только для определенной части их. Мощность самозапускающихся двигателей следует определять расчетом.

На практике стремятся, чтобы самозапуск был обеспечен для возможно бо́льшего количества двигателей механизмов ответственного назначения. Поэтому для облегчения самозапуска основной части группы ответственных двигателей автоматически, при снижениях напряжения до 60—70% номинального, отключают от шин собственного расхода:

1) все двигатели механизмов неответственного назначения;

2) двигатели ответственного назначения с постоянным моментом сопротивления, поскольку их самозапуск возможен при напряжении, более близком к номинальному;

3) некоторую часть двигателей ответственного назначения с вентиляторным моментом сопротивления, если мощность трансформаторов собственного расхода оказывается недостаточной для самозапуска всех двигателей этой группы.

Это отключение осуществляется с помощью, например, релейной защиты минимального напряжения с выдержкой времени 1—2 с.

После восстановления напряжения двигатели неответственного назначения могут включаться вручную. Двигатели ответственного назначения с постоянным моментом и отключившиеся двигатели с вентиляторным моментом сопротивления необходимо включать автоматически с помощью устройств автоматического повторного пуска (АПП) [5-1] после самозапуска группы неотключаемых ответственных двигателей с вентиляторным моментом сопротивления.

Учитывая, что время полного торможения двигателей составляет не менее 5—15 с, тогда как время отключения коротких замыканий при действии современной релейной защиты составляет 0,5—1,0 с, а время отключения источника питания и автоматического ввода резерва составляет 1,5—2,0 с, можно полагать, что включаемые с помощью АПП двигатели окажутся заторможенными лишь частично.

Методика расчета суммарной мощности неотключаемых самозапускающихся двигателей зависит прежде всего от условий их питания. При этом различают два случая питания собственного расхода электростанций:

1. Двигатели питаются от системы бесконечно большой мощности ($S_{сист} = \infty$, $x_{сист} = 0$) и отделены от нее реактивностью трансформатора собственного расхода или реактора.

2. Мощность питающих генераторов невелика и соизмерима с мощностью подключенных двигателей.

Для питания двигателей собственного расхода современных электростанций типичным является именно первый случай. При этом в качестве системы бесконечно большой мощности принимается обычная мощная энергосистема. Второй случай встречается редко, так как соответствующее этому случаю питание собственного расхода от так называемого домашнего генератора в новых установках почти не применяется.

Способ расчета допустимой мощности не отключаемых при самозапуске двигателей зависит от характера момента сопротивления приводимого ими механизма. В соответствии с этим расчет ведут применительно к асинхронным двигателям либо с постоянным, либо с вен-

тиляторным моментом сопротивления. Но так как двигатели с постоянным моментом сопротивления по современным воззрениям при снижениях напряжения должны по возможности отключаться, а затем включаться с помощью устройств автоматики и, с другой стороны, так как большую часть ответственных механизмов собственного расхода электростанций составляют насосы, вентиляторы и дымососы, то расчет мощности двигателей в режиме самозапуска будем вести применительно к механизмам с вентиляторным моментом сопротивления.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МОЩНОСТИ САМОЗАПУСКАЮЩИХСЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

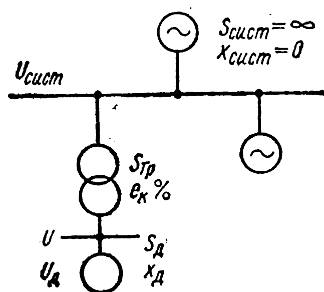


Рис. 5-1. Расчетная схема питания асинхронных двигателей собственного расхода от системы большой мощности.

Рассмотрим расчетную схему питания двигателей собственного расхода электростанции от системы большой мощности (рис. 5-1).

Приведем реактивности элементов собственного расхода к базисным условиям — к мощности и напряжению трансформатора.

Реактивность трансформатора

$$x_{*\text{Тр}} = \frac{e_{\text{к}}\%}{100}.$$

Реактивность всех самозапускающих двигателей

$$x_{*\text{д}} = x_{*\text{д. н}} \frac{S_{\text{Тр}} U_{\text{д}}^2}{S_{\text{д}\Sigma} U^2} = \frac{1}{I_{*\text{п}}} \cdot \frac{S_{\text{Тр}} U_{\text{д}}^2}{S_{\text{д}\Sigma} U^2}, \qquad (5.1)$$

где $x_{*\text{д. н}} = \frac{1}{I_{*\text{п}}}$ — индуктивное сопротивление двигателей в момент пуска, отнесенное к мощности двигателей;

$I_{*\text{п}}$ — некоторый усредненный относительный пусковой ток всех самозапускающих двигателей;

$S_{\text{Тр}}$ — номинальная мощность трансформатора, кВА;

$S_{\Sigma\text{д}} = \frac{P_{\text{д}\Sigma}}{\eta_{\text{д}} \cos\varphi_{\text{д}}}$ — номинальная мощность, потребляемая самозапускающимися двигателями, кВА;

$P_{\text{д}\Sigma}$ — суммарная мощность самозапускающихся двигателей, кВт;

$\eta_{\text{д}} \cos\varphi_{\text{д}}$ — произведение среднего значения к. п. д. на среднее значение коэффициента мощности двигателей;

$U_{\text{д}}$ — номинальное напряжение двигателей;

$U = 1{,}05 U_{\text{д}}$ — номинальное напряжение на шинах собственного расхода, т. е. вторичное напряжение трансформатора, бо̀льшее на 5% номинального напряжения двигателей.

Исходя из расчетной схемы (рис. 5-1), легко составить следующие соотношения:

$$I_{*\text{п}} (x_{*\text{Тр}} + x_{*\text{д}}) = U_{*\text{сист}} = 1; \qquad (5.2)$$

$$I_{*\text{п}} x_{*\text{д}} = U_{*\text{ш}}, \qquad (5.3)$$

где $U_{*ш} = \frac{U_ш}{U}$ — относительное напряжение на шинах собственного расхода при самозапуске двигателей;

$U_ш$ — напряжение на тех же шинах при самозапуске двигателей, кВ;

$$U_{*ш} = \frac{U_{*сист} x_{*д}}{x_{*Тр} + x_{*д}} = \frac{x_{*д}}{x_{*Тр} + x_{*д}}. \qquad (5.4)$$

Так как номинальное напряжение трансформатора на вторичной стороне больше, чем номинальное напряжение двигателей (для покрытия потери напряжения в трансформаторе при нормальной работе), то и расчетное остаточное напряжение $U_{*ост}$ на шинах в момент самозапуска учитывается на 5% большее, чем по формуле (5.4):

$$U_{*ост} = 1{,}05 U_{*ш} = \frac{1{,}05 x_{*д}}{x_{*Тр} + x_{*д}}. \qquad (5.5)$$

Разделим числитель и знаменатель правой части равенства (5.5) на $x_{*д}$ и подставим его значение из формулы (5.1):

$$U_{*ост} = \frac{1{,}05}{\frac{x_{*Тр}}{x_{*д}} + 1} = \frac{1{,}05}{x_{*Тр} I_{*п} \frac{S_{д\Sigma} U^2}{S_{Тр} U_д^2} + 1},$$

или, подставляя далее вместо мощности двигателей $S_{д\Sigma}$ ее значение через $P_{д\Sigma}$, получаем

$$U_{*ост} = \frac{1{,}05}{x_{*Тр} I_{*п} \frac{P_{д\Sigma}}{S_{Тр} \eta_д \cos\varphi_д} \cdot \frac{U^2}{U_д^2} + 1}, \qquad (5.6)$$

откуда наибольшая возможная в режиме самозапуска мощность неотключаемых двигателей в киловаттах

$$P_{д\Sigma} = \frac{(1{,}05 - U_{*ост}) \eta_д \cos\varphi_д}{U_{*ост} I_{*п} x_{*Тр}} \cdot \frac{U_д^2}{U^2} \cdot S_{Тр}. \qquad (5.7)$$

Пользуясь выражениями (5.6) и (5.7), можно решить следующие задачи:

1) при данной мощности $S_{Тр}$ и реактивности $x_{*Тр}$ трансформатора собственного расхода станции определить остаточное напряжение $U_{*ост}$ на стороне низшего напряжения при самозапуске двигателей с суммарной мощностью $P_{д\Sigma}$ в киловаттах;

2) при известном остаточном напряжении $U_{*ост}$ определить максимально возможную суммарную мощность неотключаемых самозапускающихся двигателей $P_{д\Sigma}$ в киловаттах.

Если двигатели собственного расхода станции питаются не от трансформатора, а через реактор от шин станции, то легко убедиться, что в этом случае остаточное напряжение $U_{*ост}$ и мощность двигателей $P_{д\Sigma}$ в режиме самозапуска будут определяться соответственно по формулам:

$$U_{*ост} = \frac{1{,}05}{x_{*р} I_{*п} \frac{P_{д\Sigma}}{S_р \eta_д \cos\varphi_д} + 1}; \qquad (5.8)$$

$$P_{д\Sigma} = \frac{(1{,}05 - U_{*ост})\,\eta_д \cos\varphi_д}{U_{*ост} I_{*п} x_{*р}} S_р. \quad (5.9)$$

Формулы (5.8) и (5.9) выведены исходя из равенства номинальных напряжений реактора $U_р$ и двигателей $U_д$ (например, 6 кВ). В этом случае приведенное реактивное сопротивление двигателей

$$x_{*д} = \frac{1}{I_{*п}} \cdot \frac{S_р}{S_{д\Sigma}},$$

где пропускная способность реактора определяется величиной

$$S_р = \sqrt{3}\, U_р I_р.$$

Реактивность реактора

$$x_{*р} = \frac{x_р\,\%}{100}.$$

Рассмотренный способ расчета относится к упрощенным расчетам, так как здесь:

— не учитывается коэффициент мощности самозапускающихся двигателей при пуске;

— приближенно учитываются потери напряжения в сопротивлении, включенном между источником питания и шинами (принимается коэффициент 1,05 независимо от величины этого сопротивления).

К особенностям расчета относится также то, что он ведется в предположении наиболее тяжелого случая, когда все самозапускающиеся двигатели полностью заторможены.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОЩНОСТИ САМОЗАПУСКАЮЩИХСЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

При практической оценке предельной допустимой мощности самозапускающихся двигателей после перерыва питания любой продолжительности Техническое управление предлагает [5-2] пользоваться данными табл. 1.

Таблица 1

Реактивное сопротивление цепи до шин собственного расхода 2—6 кВ (приведенное к мощности трансформатора или реактора реактированной линии), %		8	10	12	14
$\frac{P_{д\Sigma}}{S_{Тр}} \cdot 100\%$	При подхвате обесточившейся секции ненагруженным трансформатором	175	145	120	100
	При подхвате обесточившейся секции нагруженным трансформатором, равным по мощности отключившемуся, не более	150	120	100	80

В таблице приводятся допустимые отношения (в процентах) суммарной мощности двигателей $P_{д\Sigma}$ в киловаттах к номинальной мощности

трансформаторов $S_{Тр}$ в киловольт-амперах для случаев подачи питания от сети через трансформатор или реактированную линию.

Пример. *Дано*: 1. Двухобмоточный трансформатор, специально предназначенный для собственного расхода станций и подстанций с параметрами: номинальная мощность $S_{Тр} = 3200$ кВА, вторичное напряжение $U = 3{,}15$ кВ, относительная реактивность $x_{*Тр} = e_{*к} = 0{,}08$.

2. Двигатели ответственных механизмов — короткозамкнутые, с двойной беличьей клеткой и с глубоким пазом — со следующими усредненными значениями параметров: относительный пусковой ток $I_{*п} = 5{,}5$; номинальное напряжение $U_д = 3$ кВ; произведение $\eta_д \cos\varphi_д = 0{,}915 \cdot 0{,}86 = 0{,}785$; кратность максимального момента $b_н = \frac{M_м}{M_н} = 2$.

3. Остаточное напряжение $U_{*ост} = 0{,}55$.

Требуется: определить максимальную суммарную мощность самозапускающихся двигателей в киловаттах.

Решение. Подставляя заданные значения величин в уравнение (5.7), получаем

$$P_{д\Sigma} = \frac{(1{,}05 - 0{,}55)}{0{,}55 \cdot 5{,}5} \frac{0{,}785 \cdot 3^2}{0{,}08 \cdot 3{,}15^2} \cdot 3200 \approx 1{,}47 \cdot 3200 \approx 4700 \text{ кВт},$$

или $P_{д\Sigma} = 1{,}47 S_{Тр}$, т. е. отношение мощности $P_{д\Sigma}$ самозапускающихся двигателей в киловаттах к номинальной мощности $S_{Тр}$ трансформатора в киловольт-амперах составят 147%.

Если же для практической оценки предельно допустимой мощности самозапускающихся двигателей, подключаемых к заданному трансформатору $S_{тр} = 3200$ кВА, $x_{Тр} = 8\%$, пользоваться табл. 1, то при подхвате обесточенной секции ненагруженным трансформатором получим

$$\frac{P_{д\Sigma}}{S_{Тр}} \cdot 100 = 175\%,$$

а при подхвате обесточенной секции нагруженным трансформатором предельно допустимое соотношение

$$\frac{P_{д\Sigma}}{S_{Тр}} \cdot 100 \leqslant 150\%.$$

Сравнивая результаты, полученные с помощью расчета, с результатами, полученными по табл. 1, видим, что приближенная оценка предельно допустимой мощности самозапускающихся двигателей по таблице дает результаты, сходные с расчетными.

Глава шестая

РАСЧЕТ УСТАВОК АВТОМАТИЧЕСКИХ СИНХРОНИЗАТОРОВ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Синхронизаторами называются устройства, осуществляющие выбор момента замыкания цепи включения выключателя при включении генератора на параллельную работу.

В идеальном случае синхронизаторы должны включать выключатель при отсутствии уравнительного тока между включаемыми генераторами. При этом после включения генераторов их роторы не должны расходиться по фазе.

Из графика (рис. 6-1), представляющего собой изменение огибающей напряжения биений U_s в пределах угла 360°, видно, что уравнительный ток в момент включения равен нулю, если замыкание контактов выключателя происходит в точке 0, когда кривая огибающей напряжения биений проходит через свое нулевое значение.

Учитывая собственное время включения выключателя $t_{в.в}$, цепь на включение выключателя должна замыкаться с некоторым опережением момента оптимума. В идеальном случае время опережения $t_{оп}$ должно быть равно времени $t_{в.в.}$ с учетом времени привода.

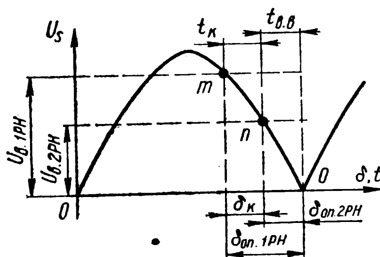


Рис. 6-1. График параметров настройки реле синхронизатора с постоянным углом опережения.

Время опережения $t_{оп}$ можно контролировать либо непосредственно, либо косвенно через угол относительного перемещения ротора $\delta_{оп}$ за время $t_{оп}$, т. е. через угол

$$\delta_{оп} = \omega_s t_{в.в},$$

где $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ — угловая скорость скольжения; ω_1 и ω_2 — угловые скорости вращения генераторов.

В соответствии с этим все синхронизаторы по способу выбора момента замыкания цепи на включение выключателя делят на две группы:

1) синхронизаторы с постоянным углом опережения, у которых момент замыкания цепи на включение выключателя определяется заданным углом опережения момента оптимума;

2) синхронизаторы с постоянным временем опережения, у которых момент замыкания цепи на включение выключателя определяется непосредственно заданным промежутком времени опережения момента оптимума.

СХЕМА СИНХРОНИЗАТОРА С ПОСТОЯННЫМ УГЛОМ ОПЕРЕЖЕНИЯ

Принципиальная схема электромеханического синхронизатора типа КА-11/13 с постоянным углом опережения приведена на рис. 6-2. Контроль угловой скорости скольжения здесь осуществляется с помощью реле 1РН, РВ и 2РН путем сравнения времени изменения напряжения биений U_s от точки m до точки n (рис. 6-1) с некоторой выдержкой времени $t_{РВ}$ реле времени РВ.

Положение контактов реле на схеме соответствует моменту прохождения напряжения U_s через свое максимальное значение. При этом реле 1РН, 2РН и 1РП находятся под током, т.е. с притянутыми якорями. При снижении напряжения U_s до напряжения возврата реле напряжения 1РН последнее подает плюс источника оперативного

тока на реле времени РВ. Дальнейшее действие устройства зависит от значения фактической угловой скорости скольжения.

Если угловая скорость скольжения больше допустимой, принимаемой в качестве расчетной, т.е. $\omega_s > \omega_{sp}$, напряжение U_s, снижаясь, достигнет точки n (рис. 6-1) раньше, чем реле времени РВ замкнет свои контакты. Следовательно, реле 2РН разомкнет свои контакты раньше, чем реле РВ замкнет свои. Контакт *1* реле 1РП будет разомкнут, поэтому после срабатывания реле РВ выходное реле 2РП питания не получит и выключатель *В* не включится.

Если угловая скорость скольжения меньше расчетной, т.е. если $\omega_s < \omega_{sp}$, реле времени РВ замкнет свои контакты раньше, чем реле

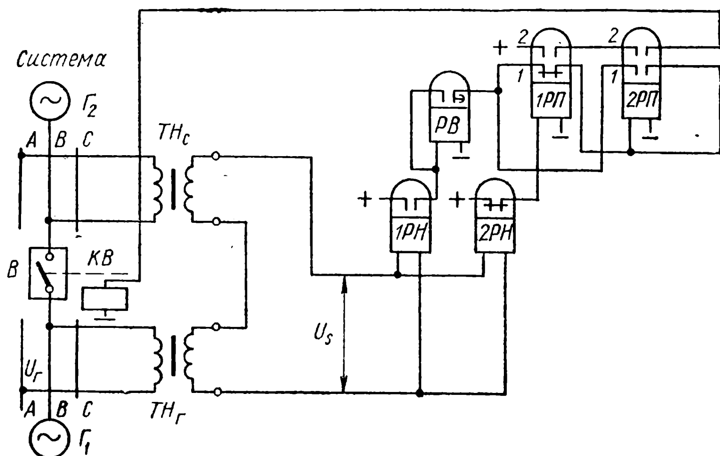


Рис. 6-2. Принципиальная схема электромеханического синхронизатора с постоянным углом опережения.

2РН разомкнет свои. При этом через контакт *1* реле 1РП будет подано питание на выходное реле 2РП. Последнее сработает, замкнет цепь на самопитание и через контакт *2* подготовит цепь на включение выключателя. При снижении напряжения U_s до напряжения возврата реле 2РН через контакт *2* реле 1РП будет подан плюс на катушку включения КВ выключателя.

При угловой скорости скольжения, равной расчетной, т.е. при $\omega_s = \omega_{sp}$, контакты выключателя включатся в момент оптимума 0, если время изменения напряжения U_s от точки n до точки 0 будет равно времени включения выключателя $t_{в.\,в}$.

Контакты выключателя могут замкнуться, таким образом, не только при угловой скорости скольжения, равной расчетной, но и при угловой скорости скольжения, меньшей расчетной, т. е. с ошибкой по углу δ_0. Это, как известно, принципиальный недостаток всех синхронизаторов с постоянным углом опережения.

Можно показать [6-1], что в двух теоретически возможных случаях угол ошибки включения δ_0 по его абсолютному значению может быть равен максимально допустимому его значению, принимаемому в качестве расчетного угла $\delta_р$. Это может быть как при фактической угловой скорости скольжения $\omega_{sф} = \omega_{sр}$, так и при $\omega_{sф} = 2\omega_{sр}$.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Расчет параметров точной синхронизации сводится к подсчету угла ошибки включения δ_0 и угловой скорости скольжения ω_s, определяющей условия устойчивости синхронизации. В результате расчета должны быть выбраны уставки синхронизатора применительно к конкретным условиям. Допустимое значение угла ошибки включения δ_0 может быть определено, исходя из допустимого значения толчка уравнительного тока. Амплитудное значение уравнительного тока, возникающего в момент замыкания контактов выключателя, в случае синхронизации турбогенераторов или гидрогенераторов с успокоительной обмоткой при равенстве сверхпереходных э. д. с., т. е. при $E''_{d1} = E''_{d2} = E''_p$, определяем по формуле

$$i''_{ур} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1{,}8 \cdot 2 \cdot E''_d}{x''_{d1} + x_{св} + x''_{d2}} \cdot \sin\frac{\delta_0}{2}, \qquad (6.1)$$

где E''_{d1} и E''_{d2} — продольные э. д. с. генераторов $Г_1$ и $Г_2$ за сверхпереходными сопротивлениями x''_{d1} и x''_{d2} по продольной оси; $x_{св}$ — эквивалентное индуктивное сопротивление элементов связи между генераторами; 1,8 — коэффициент, определяющий наличие апериодической составляющей тока; $\sqrt{2}$ — коэффициент, учитывающий амплитудное значение периодической составляющей тока; δ_0 — угол ошибки включения, т. е. угол сдвига фаз между роторами генераторов в момент включения выключателя.

При точной синхронизации действующее значение толчка уравнительного тока до недавнего времени допускалось до однократного значения номинального тока генератора, т. е. $I''_{ур} = I_н$, что соответствует мгновенному значению $i''_{ур} = \sqrt{2} I_н$. Это значение, по-видимому, следует считать заниженным, так как при самосинхронизации на основе работ последнего времени действующее значение периодической составляющей толчка уравнительного тока допускается до 3,5-кратного значения номинального тока генератора, т. е. до $I''_{ур} = 3{,}5 I_н$, что соответствует мгновенному значению $i''_{ур} = \sqrt{2} \cdot 3{,}5 I_н$.

Отсюда вывод, что для убыстрения процесса синхронизации значение допустимого толчка уравнительного тока при точной синхронизации может быть значительно повышено. Уровень этого повышения должен уточняться в каждом конкретном случае. В ориентировочных расчетах при точной синхронизации значение толчка уравнительного тока, по-видимому, может быть принято в пределах $I''_{ур} = (2 \div 2{,}5)\, I_н$, что соответствует мгновенному значению

$$i_{ур} = \sqrt{2}\,(2 \div 2{,}5)\, I_н. \qquad (6.2)$$

Момент замыкания цепи на включение выключателя определяется углом опережения $\delta_{оп2РН}$ (рис. 6-1), равным расчетному углу $\delta_р$, который соответствует допустимому углу ошибки включения δ_0. При этом напряжение возврата реле 2РН

$$U_{в2РН} = 2U \sin \frac{\delta_{оп\,2РН}}{2} = 2U \sin \frac{\delta_р}{2}. \qquad (6.3)$$

Чтобы реле 2РП (рис. 6-2) могло получить питание и, сработав, подать импульс на включение выключателя и контакты выключателя замкнулись в момент оптимума, необходимо, чтобы реле 1РН при снижении напряжения сработало раньше, чем реле 2РН, на время выдержки времени реле РВ ($t_k = t_{РВ}$).

При угловой скорости скольжения ω_{sp} времени t_k соответствует угол $\delta_k = \omega_{sp} t_k$ и якорь реле 1РН должен отпадать с опережением на угол

$$\delta_{оп1РН} = \delta_{оп2РН} + \delta_к = \delta_{оп2РН} + \omega_{sp} t_k = \omega_{sp} (t_{в.\,в} + t_k),$$

а при угловой скорости скольжения $\omega'_{sp} = 2\omega_{sp}$ времени t_k соответствует угол $\delta_к = 2\omega_{sp} t_k$ и якорь реле 1РН должен отпадать с опережением на угол

$$\delta_{оп1РН} = \delta_{оп2РН} + \delta_k = \delta_{оп2РН} + 2\omega_{sp} t_k = \omega_{sp} (t_{в.\,в} + 2t_k),$$

где

$$\delta_{оп2РН} = \delta_р = \omega_{sp} t_{в.\,в}.$$

Тогда напряжение возврата реле 1РН при ω_{sp}

$$U_{в1РН} = 2U \sin \frac{\omega_{sp} (t_{в.\,в} + t_k)}{2}, \qquad (6.4)$$

а при $\omega'_{sp} = 2\omega_{sp}$

$$U_{в1РН} = 2U \sin \frac{\omega_{sp} (t_{в.\,в} + 2t_k)}{2}. \qquad (6.5)$$

В синхронизаторе типа КА-11/13 время $t_k = t_{РВ}$ принимается 0,3—0,5с.

Расчетная угловая скорость скольжения ω_{sp} в радианах в секунду определяется из соотношения

$$\omega_{sp} = \frac{\delta_р}{t_{в.\,в}}. \qquad (6.6)$$

Как об этом было сказано выше, с точки зрения величины допустимого толчка уравнительного тока расчетная угловая скорость скольжения может быть повышена и принята равной

$$\omega'_{sp} = 2\omega_{sp}, \qquad (6.7)$$

что благоприятно скажется на убыстрении процесса подгонки угловой скорости вращения турбины и, следовательно, на убыстрении процесса синхронизации.

Выбранная угловая скорость скольжения должна быть проверена с точки зрения удержания ротора генератора в синхронизме, т. е.

должна быть проверена устойчивость синхронизации. Проверку устойчивости синхронизации можно выполнить [6-2], исходя из выражения уравнительной электрической мощности в переходном режиме в следующем упрощенном виде:

$$S'_{\text{ур}} = S'_{\text{ур.син}} + S'_{\text{ур. реакт}} = \frac{U_{\text{c}}^2}{x'_{d\text{р}}} \sin\delta + \frac{U_{\text{c}}}{2} \cdot \frac{x'_{d\text{р}} - x_{q\text{р}}}{x'_{d\text{р}} x_{q\text{р}}} \sin 2\delta, \quad (6.8)$$

где $S'_{\text{ур}}$ — уравнительная мощность генератора в относительных единицах;

$S'_{\text{ур. син}}$ и $S'_{\text{ур. реакт}}$ — соответственно синхронная и реактивная составляющие уравнительной мощности генератора;

U_{c} — напряжение сети в относительных единицах, принимаемое равным $E'_d = U_{\text{г. х. х}}$;

$x'_{d\text{р}} = x'_d + x_{\text{c}}$ — расчетное реактивное сопротивление по продольной оси в относительных единицах;

$x_{q\text{р}} = x_q + x_{\text{c}}$ — расчетное реактивное сопротивление по поперечной оси в относительных единицах;

x'_d — переходное относительное реактивное сопротивление генератора по продольной оси;

x_q — относительное реактивное сопротивление генератора по поперечной оси;

x_{c} — относительное реактивное сопротивление системы, приведенное к мощности генератора;

δ — угол относительного смещения ротора генератора.

При синхронизации турбогенераторов, а в ряде случаев и гидрогенераторов, с системой членом $S'_{\text{ур. реакт}}$ уравнения (6.8) можно пренебречь по сравнению с членом $S'_{\text{ур. син}}$ (в чем легко убедиться в том или ином конкретном случае путем подстановки и сравнения их значений при $\sin\delta = 1$ и $\sin 2\delta = 1$). В этих случаях уравнение 6.8) принимает вид

$$S'_{\text{ур}} = S'_{\text{ур. син}} = \frac{U_{\text{c}}^2}{x'_{d\text{р}}} \sin\delta \quad (6.9)$$

и устойчивость синхронизации может быть проверена с помощью выражения

$$\cos\delta_{\text{пр}} = \cos\delta_0 - 157\,(x'_d + x_{\text{c}})\,T_j \left(\frac{S\%}{100}\right)^2. \quad (6.10)$$

где $\delta_{\text{пр}}$ — наибольший (предельный) угол относительного смещения роторов, получающийся в данном случае синхронизации;

δ_0 — угол ошибки в момент включения в электрических градусах;

T_j — постоянная инерции вращающихся частей турбины и генератора в секундах.

Входящее в выражение (6.10) скольжение вычисляется из соотношения

$$\frac{s\,\%}{100} = 2\,\frac{\delta_0}{57{,}3 \cdot 314 \cdot t_{\text{в. в}}}, \quad (6.11)$$

где $s\%$ — скольжение, соответствующее угловой скорости скольжения $\omega'_{sp} = 2\omega_{sp}$ (что учитывается коэффициентом 2 в правой части выражения (6.11));

$t_{\text{в. в}}$ — время включения выключателя, с;

δ_0 — угол ошибки в момент включения в электрических градусах.

Условие устойчивости синхронизации удовлетворяется, если определяемый по выражению (6.10) косинус предельного угла

$$\cos\delta_{пр} > -1, \qquad (6.12)$$

или

$$\delta_{пр} < 180°.$$

В тех случаях, когда членом $S'_{ур.\,реакт}$ в уравнении (6.8) пренебречь нельзя, устойчивость синхронизации гидрогенераторов с системой может быть проверена с помощью выражения

$$\delta_{пр} = \sqrt{\delta_0^2 + \frac{314}{C}\left(\frac{s\%}{100}\right)^2}, \qquad (6.13)$$

где δ_0 — расчетный угол в радианах;

$$C = \frac{0{,}81}{x'_{dр}} + 0{,}81\frac{x'_{dр} - x_{qр}}{x'_{dр}x_{qр}}. \qquad (6.14)$$

Остальные величины, входящие в выражение (6.13), те же, что и в формуле (6.10). Реактивные сопротивления $x'_{dр}$ и $x_{qр}$, входящие в выражение (6.14) те же, что и в выражении (6.8).

Толчок уравнительной мощности в относительных единицах при предельном угле $\delta_{пр}$ определяется по формуле

$$S'_{ур} = C\delta_{пр}, \qquad (6.15)$$

где $\delta_{пр}$ — предельный угол в радианах.

Пример 1. *Дано:* 1. Турбогенератор мощностью 25000 кВт; $\cos\varphi = 0{,}8$; $E''_d = U_г = 1{,}0$; $x'_d = 0{,}216$; $x''_d = 0{,}131$ включается на параллельную работу с системой сравнительно большой мощности с приведенными к напряжению и мощности генератора величинами $U_c = 1{,}0$; $x'_{dc} = 0{,}216$; $x''_{dc} = 0{,}15$.

2. Постоянная времени инерции вращающихся частей турбины и генератора $T_j = 4{,}75$с.

3. Приведенное к мощности генератора сопротивление связи $x_{св} = 0{,}15$. Сопротивление системы с учетом сопротивления связи в переходном режиме $x_c = x'_{dc} + x_{св} = 0{,}216 + 0{,}15 = 0{,}366$.

4. Время включения генераторного выключателя $t_{в.в} = 0{,}7$ с.

5. Выдержка времени реле времени РВ (рис. 6-2) намечается $t_{РВ} = t_k = 0{,}3$ с.

Требуется: рассчитать уставки синхронизатора типа КА-11/13 для синхронизации с системой турбогенератора, работающего на холостом ходу, и проверить устойчивость синхронизации.

Решение. Из формулы (6.2) принимаем мгновенное значение уравнительного тока $i''_{ур} = 2\sqrt{2}$ и по формуле (6.1) определяем

$$\sin\frac{\delta_0}{2} = i''_{ур}\frac{x''_{d_1} + x_{св} + x''_{dc}}{\sqrt{2}\cdot 1{,}8\cdot 2\cdot E''_d} = 2\sqrt{2}\,\frac{0{,}131 + 0{,}15 + 0{,}15}{\sqrt{2}\cdot 1{,}8\cdot 2\cdot 1} = 0{,}239,$$

откуда

$$\delta_0 = \delta_р = 2\cdot 13°50' = 27{,}6°,$$

или в радианах

$$\delta_0 = \delta_р = \frac{27{,}6}{57{,}3} = 0{,}48 \text{ рад}.$$

Напряжение возврата реле 2РН (рис. 6-2) определяем по формуле (6.3)

$$U_{\text{в2РН}} = 2U\sin\frac{\delta_0}{2} = 2\cdot 110\sin\frac{27°40'}{2} = 220\sin 13°50' = 53\ \text{В}.$$

Расчетную угловую скорость скольжения находим по выражению (6.6)

$$\omega_{sp} = \frac{\delta_p}{t_{\text{в.в}}} = \frac{0,48}{0,7} = 0,685\ \text{рад/с},$$

или скольжение в процентах

$$s\% = \frac{\omega_{sp}}{2\pi f}\cdot 100 = \frac{0,685}{314}\cdot 100 = 0,219\%.$$

Напряжение возврата реле 1РН при $\omega_s = \omega_{sp}$ определяем по формуле (6.4)

$$U_{\text{в 1РН}} = 2U\sin\frac{\omega_{sp}(t_{\text{в.в}} + t_k)}{2} = 2\cdot 110\sin\frac{0,685\,(0,7+0,3)}{2} = 220\sin 0,342,$$

или, переводя радианную меру угла в градусную, получаем

$$U_{\text{в 1РН}} = 220\sin 0,342\cdot 57,3 = 220\sin 19,6° = 220\sin 19°36' = 74\ \text{В}.$$

Напряжение возврата $U_{\text{в 1РН}} = 74$ В выбрано при $s\% = 0,219\%$, т. е. при очень малом скольжении, что может увеличить длительность процесса синхронизации.

Если в целях убыстрения процесса синхронизации полученное по формуле (6.6) значение скольжения увеличить до значения $\omega_{sp}' = 2\omega_{sp}$, то при этом напряжение возврата реле 1РН определяем по выражению (6.5)

$$U_{\text{в 1РН}} = 2U\sin\frac{\omega_{sp}(t_{\text{в.в}} + 2t_k)}{2} = 2\cdot 110\sin\frac{0,685\,(0,7+2\cdot 0,3)}{2} =$$

$$= 220\sin\frac{0,685\cdot 1,3}{2} = 220\sin 0,445,$$

или, переводя радианную меру угла в градусную, получаем

$$U_{\text{в 1РН}} = 220\sin 0,445\cdot 57,3 = 220\sin 25,4° = 220\sin 25°24' = 220\cdot 0,429 \approx 95\ \text{В}.$$

Значение напряжения возврата $U_{\text{в 1РН}} = 95$ В можно принять, если соответствующая ему угловая скорость скольжения $\omega_{sp}' = 2\omega_{sp}$ окажется допустимой с точки зрения устойчивости синхронизации. Проверим это.

Значение скольжения определим по формуле (6.11)

$$\frac{s\%}{100} = 2\,\frac{\delta_0}{57,3\cdot 314\cdot t_{\text{в.в}}} = 2\,\frac{27,6}{57,3\cdot 314\cdot 0,7} = 0,00438.$$

Тогда по выражению (6.10) при включении турбогенератора косинус предельного угла

$$\cos\delta_{\text{пр}} = \cos\delta_0 - 157\,(x_d' + x_c)\,T_j\left(\frac{s\%}{100}\right)^2 = \cos 27°40' - 157\,(0,216 +$$

$$+ 0,366)\,4,75\cdot 0,00438^2 = 0,8857 - 157\cdot 0,582\cdot 4,75\cdot 192\cdot 10^{-7} = 0,8773 > -1,$$

или

$$\delta_{\text{пр}} = 28°40' < 180°,$$

т. е. условие устойчивости синхронизации удовлетворяется.

Пример 2. *Дано:* 1. Гидрогенератор мощностью 30 000 кВА; $E_d' = U_\text{г} = 1$; $x_d' = 0,253$; $x_q = 0,453$ включается на параллельную работу с системой бесконечно большой мощности с величинами $x_{d0}' = 0$ и $x_{dc}'' = 0$.

2. Постоянная инерции подвижных частей турбины и генератора $T_j = 6$ с.

3. Приведенное к мощности генератора сопротивление связи с системой $x_{св} = 0,25$. Сопротивление системы с учетом сопротивления связи в переходном режиме $x_с = x_{св} = 0,25$.

4. Время включения генераторного выключателя $t_{в.в} = 0,85$ с.

5. Выдержка времени реле РВ (рис. 6-2) $t_{РВ} = t_k = 0,3$ с.

Требуется: рассчитать уставки синхронизатора типа КА-11/13 для синхронизации с системой гидрогенератора, работающего на холостом ходу и проверить устойчивость синхронизации.

Решение. По формуле (6.2) принимаем $i''_{ур} = 2\sqrt{2}$ и при $E''_d = E'_d$, $x''_d = x'_d$ определяем по выражению (6.1)

$$\sin\frac{\delta_0}{2} = i''_{ур}\frac{x'_d + x_{св}}{\sqrt{2}\cdot 1,8\cdot 2\cdot E'_d} = 2\sqrt{2}\,\frac{0,253 + 0,25}{\sqrt{2}\cdot 1,8\cdot 2\cdot 1} = 0,28,$$

откуда угол δ_0, принимаемый в качестве расчетного угла $\delta_р$, в градусах

$$\delta_0 = \delta_р = 16°10'\cdot 2 = 32,3°,$$

или в радианах

$$\delta_0 = \delta_р = \frac{32,3}{57,3} = 0,564 \text{ рад}.$$

Напряжение возврата реле 2РН (рис. 6-2) определяем по формуле (6.3)

$$U_{в\,2РН} = 2U\sin\frac{\delta_р}{2} = 2\cdot 110\sin\frac{32°20'}{2} = 220\cdot\sin 16°10' = 61,6 \text{ В}.$$

Расчетную угловую скорость скольжения находим по формуле (6.6)

$$\omega_{sр} = \frac{\delta_р}{t_{в.в}} = \frac{0,564}{0,85} = 0,664 \text{ рад/с},$$

или скольжение в процентах

$$s_р\% = \frac{\omega_{sр}}{2\pi f}\cdot 100 = \frac{0,664}{314}\cdot 100 = 0,212\%.$$

Напряжение возврата реле 1РН при $\omega_s = \omega_{sр}$ находим из выражения (6.4)

$$U_{в\,1РН} = 2U\sin\frac{\omega_{sр}(t_{в.в} + t_k)}{2} = 2\cdot 110\sin\frac{0,664\,(0,85 + 0,3)}{2} = 220\cdot\sin 0,382,$$

или, переводя радианную меру угла в градусную, получаем

$$U_{в1РН} = 220\sin 0,382\cdot 57,3 = 220\sin 21,9° = 220\sin 21°54' = 220\cdot 0,372 \approx 82 \text{ В}.$$

Если в целях убыстрения процесса синхронизации значение угловой скорости скольжения увеличить до значения $\omega'_{sр} = 2\omega_{sр}$, то для этого напряжение возврата реле 1РН следует выбрать по формуле (6.5)

$$U_{в1РН} = 2U\sin\frac{\omega_{sр}(t_{в.в} + 2t_k)}{2} = 2\cdot 110\sin\frac{0,664\,(0,85 + 2\cdot 0,3)}{2} = 220\sin 0,481,$$

или, переводя радианную меру угла в градусную, получаем

$$U_{в1рН} = 220\sin 0,481\cdot 57,3 = 220\sin 27,6° = 220\sin 27°36' = 220\cdot 0,463 = 102 \text{ В}.$$

Для определения угла $\delta_{пр}$ относительного смещения фаз роторов предварительно сравним между собой наибольшие значения уравнительной мощности за счет синхронного (при $\sin\delta = 1$) и реактивного (при $\sin 2\delta = 1$) моментов. По (6.8) получим

$$S_{ур.син} = \frac{U_c^2}{x_{dp}} \sin\delta = \frac{U_c^2}{x'_d + x_c} = \frac{1}{0,253 + 0,25} = 1,99;$$

$$S'_{ур.реакт} = \frac{U_c}{2} \cdot \frac{x'_{dp} - x_{qp}}{x'_{dp} x_{qp}} \sin 2\delta = \frac{U_c}{2} \cdot \frac{(x'_d + x_c) - (x_q + x_c)}{(x'_d + x_c)(x_q + x_c)} \sin 2\delta =$$

$$= \frac{U_c}{2} \cdot \frac{x'_d - x_q}{(x'_d + x_c)(x_q + x_c)} \sin 2\delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,253 - 0,453}{(0,253 + 0,25)(0,453 + 0,25)} = -0,284,$$

что составляет около 15% уравнительной мощности за счет синхронного момента. Так как пренебречь этой величиной нельзя, то проверку устойчивости синхронизации в рассматриваемом случае следует выполнить, пользуясь выражением (6.13).

Входящий в выражение (6.13) коэффициент C определяем по формуле (6.14)

$$C = \frac{0,81}{x'_{dp}} + 0,81 \frac{x'_{dp} - x_{qp}}{x'_{dp} x_{qp}} = \frac{0,81}{0,503} + 0,81 \frac{0,503 - 0,703}{0,503 \quad 0,703} = 1,15.$$

Значение скольжения находим по формуле (6.11)

$$\frac{s\%}{100} = 2 \frac{\delta_0}{57,3 \cdot 314 \cdot t_{в.в}} = 2 \frac{32,3}{57,3 \cdot 314 \cdot 0,85} = 0,00423.$$

Тогда по формуле (6.13) находим предельный угол

$$\delta_{пр} = \sqrt{\delta_0^2 + \frac{314}{C} T_i \left(\frac{s\%}{100}\right)^2} = \sqrt{0,564^2 + \frac{314}{1,15} 6 \cdot 0,00423^2} = 0,589 \text{ рад},$$

или в градусах

$$\delta_{пр} = 0,589 \cdot 57,3 = 33,8° < 180°.$$

Толчок уравнительной мощности при предельном угле $\delta_{пр}$ по выражению (6.15)

$$S'_{ур} = C\delta_{пр} = 1,15 \cdot 0,589 = 0,677.$$

СИНХРОНИЗАТОРЫ С ПОСТОЯННЫМ УГЛОМ ОПЕРЕЖЕНИЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

К достоинствам рассмотренного выше электромеханического синхронизатора типа КА-11/13 относится его дешевизна и простота схемы. К недостаткам синхронизатора относятся некоторые погрешности действия его инерционных подвижных электромеханических элементов, обусловленные их трением и наличием контактных устройств.

Более совершенный синхронизатор с тем же принципом действия можно получить, заменив его электромеханические элементы безынерционными, выполненными с помощью электронных ламп или полупроводниковых приборов.

На рис. 6-3 приведена структурная схема синхронизатора с постоянным углом опережения, разработанного в Киевском политехническом институте [6-3], выполненного на транзисторах, а на рис. 6-4 — принципиальная схема этого синхронизатора.

Основные узлы этих схем:

$П_1$ и $П_2$ — пусковые или измерительные органы синхронизатора, выполненные с помощью триггеров Шмидта $Тг_1$ и $Тг_2$;

В — орган выдержки времени, состоящий из транзистора T_5, зарядного регулируемого резистора R_{18}, конденсатора C_5 и триггера $Тг_3$ с одним устойчивым состоянием;

Л — логическая схема, состоящая из двух логических элементов И ($Т_8$, $Т_9$ и $Т_{12}$, $Т_{13}$) и статического триггера $Тг_4$;

РП — выходное электромагнитное реле.

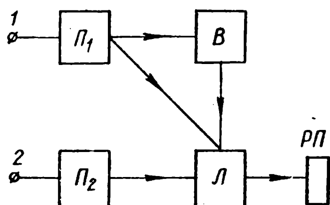


Рис. 6-3. Структурная схема синхронизатора с постоянным углом опережения, выполненного на транзисторах.

Все узлы схемы составлены в основном с помощью типовых элементов. К ним относятся триггер с одним устойчивым состоянием, статический триггер и логический элемент И на двух транзисторах. Вся схема рис. 6-4 выполнена на однотипных транзисторах типа МП4 и для ее питания требуется один источник постоянного тока напряжением 12В.

Принцип действия синхронизатора. Синхронизатор реагирует на подводимое к зажимам *1* и *2* напряжение биения

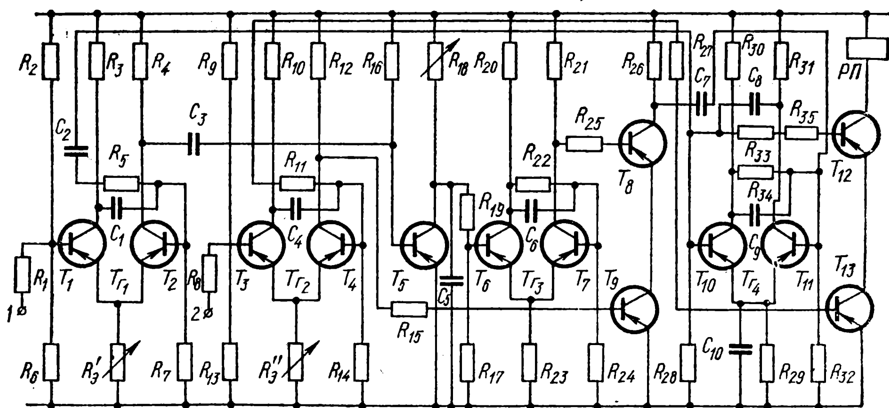


Рис. 6-4. Принципиальная схема синхронизатора с постоянным углом опережения, выполненного на транзисторах.

U_s. Контроль угловой скорости скольжения ω_s осуществляется путем сравнения времени t_{mn} изменения напряжения биения U_s (рис. 6-5) от точки *m* до точки *n* с постоянным промежутком времени $t_В$ срабатывания органа времени В синхронизатора. Последнее регулируется резистором R_{18} (рис. 6-4).

В качестве исходного принимаем состояние синхронизатора, при котором к зажимам *1* и *2* подведено максимальное значение отрица-

тельной полуволны напряжения биения U_s. При этом транзисторы T_1, T_3, T_5, T_7, T_9 и T_{11} открыты, а T_2, T_4, T_6, T_8, T_{10}, T_{12} и T_{13} — закрыты. Выходное реле РП обесточено, конденсатор C_5 реле времени разряжен, поскольку он закорочен транзистором T_5.

При снижении амплитуды отрицательной полуволны напряжения биения до напряжения отпускания $U_{\text{отпП1}}$ пускового органа $П_1$ транзистор T_1 последнего закрывается, а T_2 открывается. За счет энергии, накопленной в конденсаторе C_3, база открытого транзистора T_5 получает положительное смещение по отношению к его эмиттеру. При этом T_5 быстро закрывается и через зарядный резистор R_{18} начинает заряжаться конденсатор C_5 органа выдержки времени. При возрастании напряжения на конденсаторе C_5 до значения напряжения срабатывания триггера Тг3 транзистор T_6 скачком открывается, а T_7 закрывается и

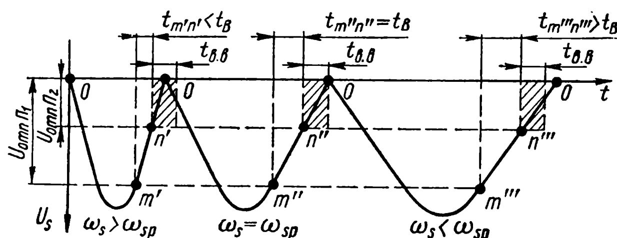


Рис. 6-5. Иллюстрация включения генератора при $\omega_s < \omega_{sp}$ не в момент оптимума (O), а с ошибкой.

отрицательный потенциал с коллектора T_7 поступает на базу транзистора T_8 логического элемента И (T_8, T_9). Дальнейшее действие синхронизатора будет различным в зависимости от значения угловой скорости скольжения ω_s.

При угловой скорости скольжения, равной или меньше расчетной, конденсатор C_5 успеет зарядиться до напряжения срабатывания триггера Тг3 раньше, чем амплитуда напряжения биения снизится до значения $U_{\text{отпП2}}$ и отпустит второй измерительный орган $П_2$ (Тг2). При этом на базы обоих транзисторов первого логического элемента И (T_8, T_9) будет подано отрицательное напряжение и они откроются.

Положительный потенциал с коллектора открывшегося T_8 через заряженный конденсатор C_7 подается на базу транзистора T_{11} триггера Тг4, последний переключается во второе устойчивое состояние, на базу T_{12} второго логического элемента И (T_{12}, T_{13}) подается отрицательное напряжение и T_{12} открывается. После отпускания второго измерительного органа $П_2$(T_3, T_4) отрицательное напряжение подается на базу T_{13}, последний также открывается и выходное реле РП срабатывает.

При угловой скорости скольжения больше расчетной ($\omega_s > \omega_{sp}$) первый логический элемент И(T_8, T_9) не сработает, поскольку измерительный орган $П_2$(T_3, T_4) отпустит раньше, чем успеет сработать орган времени. Следовательно, T_9 будет заперт. Второй логический элемент И (T_{12}, T_{13}) и выходное реле РП работать не будут.

Испытания показали, что синхронизатор надежно работает при отклонении напряжения источника питания на $\pm 10\%$.

Недостатком рассмотренного сихронизатора на полупроводниковых приборах, как и всякого другого синхронизатора с постоянным углом опережения, является то, что он включает генератор в момент оптимума (0) только при угловой скорости скольжения, равной расчетной (рис. 6-5). При угловой скорости скольжения, меньшей расчетной ($\omega_s < \omega_{sp}$), синхронизатор включает с ошибкой по углу δ_0, которая в предельном, теоретически возможном случае может достигать значения расчетного угла опережения δ_p, т. е.

$$\delta_0 = \omega_{sp} t_{в.в} = \delta_p, \tag{6.16}$$

где $t_{в.в}$ — время включения выключателя.

Однако этот недостаток синхронизаторов с постоянным углом опережения нельзя считать определяющим при выборе типа синхронизатора. Опыт применения самосинхронизации и несинхронного АПВ смягчает этот недостаток. Кроме того, разброс во времени включения силовых выключателей может существенно снижать точность работы значительно более сложных типов синхронизаторов.

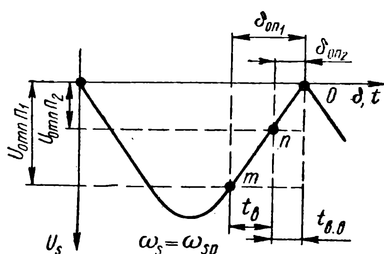


Рис. 6-6. Выбор уставок пусковых органов $П_1$ и $П_2$ при $\omega_s = \omega_{sp}$.

Расчет рассматриваемого синхронизатора на полупроводниковых приборах сводится к выбору уставок $U_{отпП_1}$ и $U_{отпП_2}$ (рис. 6-6) пусковых органов $П_1$ и $П_2$, подобно тому, как это делалось в примерах *1* и *2* при определении установок $U_{в1РН}$ и $U_{в2РН}$. При этом

$$U_{отп\,П_1} = 2U \sin \frac{\omega_{sp}(t_в + t_В)}{2} \tag{6.17}$$

и

$$U_{отпП_2} = 2U \sin \frac{\delta_p}{2}, \tag{6.18}$$

где $t_В$ — время замедления органа выдержки времени В;

$\delta_p = \delta_0$ — расчетный угол опережения, равный углу ошибки включения, определяемый из формулы (6.1) с учетом (6.2).

Расчет параметров полупроводниковых приборов в схеме рис. 6-4 опускаем.

СИНХРОНИЗАТОРЫ С ПОСТОЯННЫМ ВРЕМЕНЕМ ОПЕРЕЖЕНИЯ

Широкое распространение получили автоматические синхронизаторы с постоянным временем опережения типа АСУ-11 и АСУ-12, разработанные ВНИИэлектропривод [6-1, 6-5]. Синхронизаторы предназначены для точной синхронизации генераторов любых типов и мощностей, а также для синхронизации частей энергосистем между собой.

Синхронизаторы обоих исполнений содержат органы уравнивания угловых скоростей вращения (частот синхронизируемых напряжений), а синхронизатор типа АСУ-12 — также и орган уравнивания напряжений. В остальном оба исполнения синхронизатора одинаковы.

На рис. 6-7 показана упрощенная схема синхронизатора типа АСУ. Положение контактов реле 1РП, 2РП, 3РП соответствует наибольшему значению огибающей напряжения биений U_s и замкнутому состоянию контактов реле нагрева ламп РНЛ. Это реле замыкает свои контакты с выдержкой времени около 40 с после срабатывания реле пуска РП,

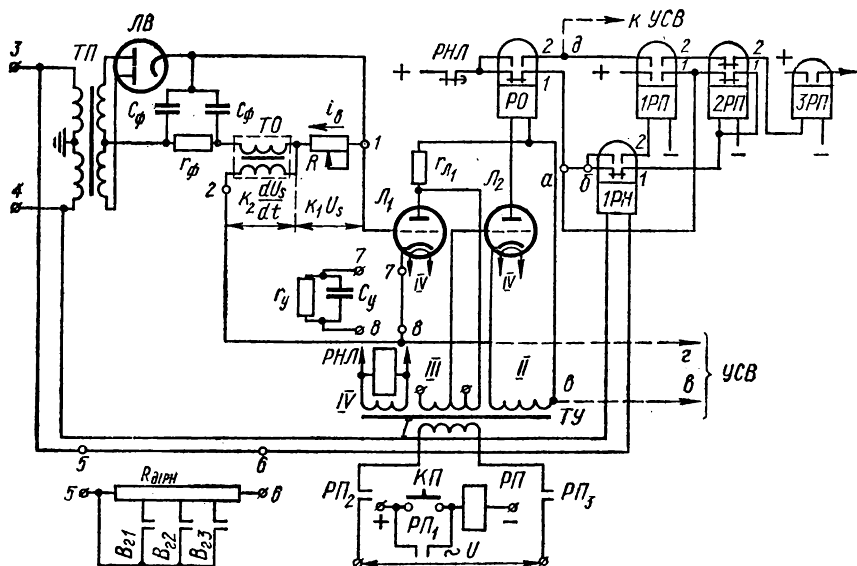


Рис. 6-7. Упрощенная схема синхронизатора типа АСУ с постоянным временем опережения.

включающего входные цепи синхронизатора (на схеме не показано) и подключающего трансформатор усилителя ТУ. Это время необходимо для предварительного прогрева ламп синхронизатора.

Синхронизаторы типа АСУ состоят из следующих основных органов: измерительного, опережения, управления, блокировки, уравнивания частоты и уравнивания напряжения (только в АСУ-12).

В измерительный орган входят трансформаторы напряжения генератора и сети (на схеме не показаны) реле 1РН, включенное на напряжение биений U_s, промежуточный трансформатор ТП, кенотронный ламповый выпрямитель ЛВ и фильтр $C_ф$, $r_ф$. Кенотрон ЛВ выпрямляет напряжение биений U_s(рис. 6-8, *б*), а фильтр $C_ф$, $r_ф$ превращает выпрямленное напряжение биения в пульсирующее напряжение, пропорциональное напряжению биения (рис. 6-8, *в*).

В орган опережения входят сопротивление R (рис. 6-7 и 6-10) с ответвлениями для выбора уставки времени опережения $t_о$, трансфор-

матор опережения ТО, трансформатор усилителя ТУ, двухкаскадный однополупериодный усилитель, выполненный на лампах $Л_1$ и $Л_2$, и выходное реле опережения РО.

В органы управления и блокировки входят кнопка пуска КП, реле пуска РП, реле блокировки 1РП и 2РП и выходное реле синхронизатора 3РП. Реле пуска РП подключает трансформатор ТП к трансформаторам напряжения генератора и сети, а также подключает питание на трансформатор усилителя ТУ и подает оперативный постоянный ток (на схеме не показано).

Орган уравнивания частоты включается на трансформаторы напряжения генератора и сети и воздействует на механизм изменения скорости вращения МИСВ с командой *Прибавить* или *Убавить* обороты.

Орган уравнивания напряжений (в АСУ-12) замеряет величину и знак разности амплитуд синхронизируемых напряжений и воздействует на устройство регулирования возбуждения синхронизируемого генератора.

Через напряжение биений U_s (рис. 6-8) обозначено текущее значение огибающей напряжения биений u_s. При этом можно показать [6-1], что

$$U_s = 2U \sin \frac{\omega_s t}{2},$$

где U — синхронизируемое напряжение ($U = U_I = U_{II}$);

ω_s — угловая скорость скольжения ($\omega_s = \omega_I - \omega_{II}$).

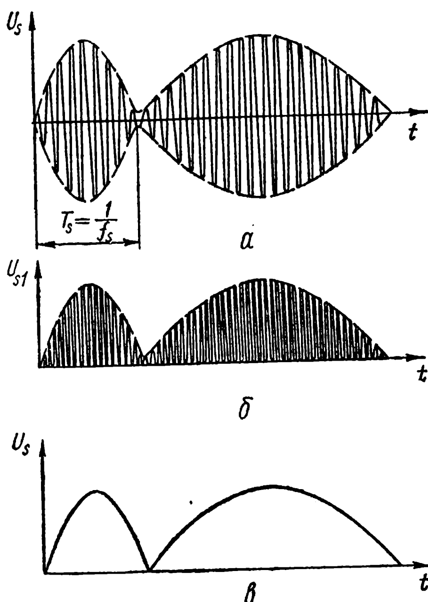


Рис. 6-8. График изменения напряжения: *а* — напряжения биений; *б* — выпрямленного напряжения биений после выпрямителя; *в* — выпрямленного напряжения биений после сглаживающего фильтра.

Управляющее напряжение на сетке лампы $Л_1$ (рис. 6-7) состоит из двух составляющих:

$$u_1 = k' i_в \text{ и } u_2 = k'' \frac{di_в}{dt}.$$

В цепи выпрямленного тока последовательно с небольшим сопротивлением $Z_{ТО}$ трансформатора опережения, работающего в ненасыщенном режиме и практически без нагрузки, включено относительно большое активное сопротивление R. Поэтому в этой цепи, характеризуемой неравенством $L \ll R$, напряжение на сопротивлении можно считать повторяющим форму выпрямленного и сглаженного напряжения U_s.

Тогда можно написать

$$u_1 = k' i_{\text{в}} = k_1 U_s = k_1 2U \sin\frac{\omega_s t}{2}$$

и

$$u_2 = k'' \frac{di_{\text{в}}}{dt} = k_2 \frac{dU_s}{dt} = k_2 \frac{d}{dt}\left(2U \sin\frac{\omega_s t}{2}\right) = k_2 \omega_s U \cos\frac{\omega_s t}{2}.$$

Схема включения лампового усилителя построена с учетом характеристик ламп таким образом, что моменту отпирания лампы $Л_2$ соответствует нулевой потенциал на сетке лампы $Л_1$.

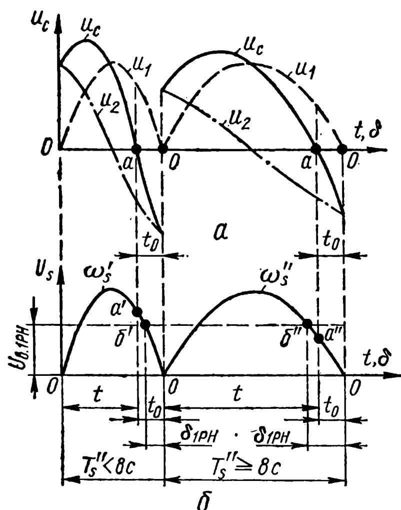


Рис. 6-9. Диаграмма изменения во времени напряжений на сетке лампы $Л_1$ (*а*) и очередности срабатывания реле 1РН и РО в зависимости от угловой скорости скольжения (*б*).

При наличии на сетке лампы $Л_1$ напряжения $u_{\text{с}} = u_1 + u_2$ с положительным знаком ее анодная цепь открыта, а анодная цепь лампы $Л_2$ заперта, ток в реле опережения РО отсутствует.

При наличии на сетке лампы $Л_1$ напряжения $u_{\text{с}}$, равного нулю или с отрицательным знаком, ее анодная цепь заперта, напряжение на сетке лампы $Л_2$ получается положительным, ее анодная цепь открывается, в обмотке реле опережения РО появляется ток и оно срабатывает.

Диаграмма изменения во времени напряжений u_1 и u_2 и суммарного напряжения $u_{\text{с}}$ на сетке лампы для двух циклов биений показана на рис. 6-9, *а*. Для точки *а* нулевого потенциала на сетке лампы $Л_1$, т. е. в момент отпирания лампы $Л_2$, получаем

$$u_{\text{с}} = u_1 + u_2 = 0,$$

т. е.

$$u_1 = -u_2,$$

или

$$2k_1 U \sin\frac{\omega_s t}{2} = -k_2 \omega_s U \cos\frac{\omega_s t}{2}. \tag{6.19}$$

При этом время включения выключателей по сравнению с временем цикла биений, при котором разрешается включение, весьма мало (порядка 5%). Следовательно, рассматриваемая точка *а* нулевого потенциала на сетке лампы $Л_1$ лежит в полосе малых углов, когда значение $\cos\frac{\omega_s t}{2} \approx 1$, а значение $\sin\frac{\omega_s t}{2} \approx \frac{\omega_s t}{2}$.

Тогда, в соответствии с уравнением (6.19), определяемое точкой *а* время опережения

$$t_{\text{оп}} \approx \frac{k_2}{k_1} = \text{const},$$

т. е. величина постоянная, не зависящая от угловой скорости скольжения ω_s. Величина t_0 принимается равной времени включения выключателя $t_{в.в}$.

Контроль угловой скорости скольжения ω_s, при которой разрешается включение выключателя, осуществляется следующим образом. На рис. 6-9, *б* приведена кривая напряжения биений, на которое включено реле 1РН. Возврат этого реле происходит на спаде этой кривой, в точке *б'* или *б''*. Если угловая скорость скольжения ω_s больше допустимой ($\omega_s > \omega_{s\,доп}$), то реле опережения РО срабатывает в точке *а'* первого цикла, т. е. раньше, чем реле 1РН отпустит якорь в точке *б'* того же цикла. При этом на контакте $РО_1$ реле РО (рис. 6-7) разомкнется цепь питания обмотки реле 2РП, якорь последнего отпадет и его контакты разомкнутся. Поэтому в последующий момент при отпадании якоря реле 1РН цепь обмотки выходного реле 3РП замкнуться не сможет и выключатель не включится.

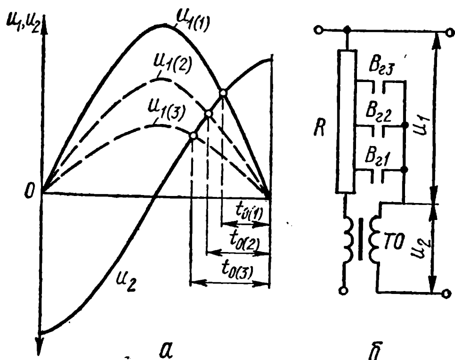


Рис. 6-10. График изменения напряжений и времени опережения (*а*) в зависимости от выбираемой отпайки от сопротивления *R* (*б*) (выбор времени опережения t_0).

Если же угловая скорость скольжения ω_s уменьшится настолько, что реле опережения РО сработает в точке *а''* второго цикла, т. е. позже, чем реле 1РН отпустит якорь в точке *б''*, то выключатель включится. Действительно, после отпадания якоря реле 1РН на его контакте $1РН_2$ замкнется цепь обмотки реле 1РП, которое срабатывает и контактом $1РП_1$ замыкает цепь самоудерживания реле 2РП, а контактом $1РП_2$ подготавливает цепь питания обмотки реле 3РП. В последующий момент при срабатывании реле опережения РО на его контакте $РО_2$ замыкается цепь питания обмотки выходного реле 3РП, которое срабатывает и включает выключатель.

Изменение уставки времени опережения t_0 в синхронизаторах типа АСУ осуществляется путем изменения точки отпайки от сопротивления *R*. При этом изменяются ординаты кривой напряжения u_1 при неизменной кривой напряжения u_2 (u_1 и u_2 — составляющие напряжения u_c на сетке лампы $Л_1$). На рис. 6-10, *а* показаны кривые напряжения u_1 для трех значений сопротивления *R*. Напряжение u_2 для удобства сравнения ординат напряжений показано с обратным знаком. Из рассмотрения этих кривых следует, что при различных значениях сопротивления *R* (рис. 6-10, *б*), т. е. при различных величинах составляющей u_1 и неизменной величине составляющей напряжения u_2 их равенство (момент отпирания лампы $Л_2$) достигается при различных значениях времени опережения оптимума t_0. При этом последнее увеличивается с уменьшением сопротивления *R* и наоборот.

В синхронизаторах типа АСУ время опережения t_0 может быть получено в пределах 0,2—1,6 с и имеет три фиксированных уставки, осуществляемые путем соответствующих отпаек от сопротивления R. Уставки фиксируются на заводе по заказу потребителя в соответствии с временем срабатывания выключателей $t_{в.в}$ генераторов, для которых предназначается синхронизатор. Переход с одной уставки на другую осуществляется либо вручную, поворотом трехпозиционного коммутаторного переключателя без какой бы то ни было переналадки синхронизатора, либо автоматически, контактами блокировочного реле того или иного синхронизируемого генератора. Контактами этих же реле изменяется величина добавочного сопротивления $R_{д1РН}$ (рис. 6-7) в цепи обмотки реле 1РН, подключаемого между зажимами *5* и *6*. Обмотки блокировочных реле на схеме в целях упрощения не показаны. Схему с двумя блокировочными реле можно найти в литературе [6-4].

Рассмотренные выше синхронизаторы типа АСУ с постоянным временем опережения, приспособленные к включению генераторов на параллельную работу методом точной синхронизации в нормальных условиях, не позволяют производить быстрое автоматическое включение машин в аварийных условиях. Объясняется это тем, что только на разогрев электрических ламп, входящих в устройство синхронизатора, требуется время порядка 15—20 с. К тому же в аварийных условиях синхронизаторы типа АСУ могут отказывать по причине изменения частоты в системе и скорости вращения влючаемого генератора. Это обстоятельство обусловило появление нового автоматического синхронизатора типа АСТ-4 с постоянным временем опережения, разработанного лабораторией Ленэнерго для включения генераторов методом точной синхронизации [6-6, 6-7]. К преимуществам этого синхронизатора относится отсутствие электронных ламп, правильная работа при пониженной (до 45 Гц), нормальной и повышенной частоте, а также при колебании амплитуд синхронизируемых напряжений в пределах $\pm 15\%$ от нормального значения.

Схема автоматического синхронизатора типа АСТ-4 приведена на рис. 6-11. В схему входят пять основных элементов: дифференцирующий трансформатор ДТ, реле опережения РО, реле контроля разности частот КЧ, реле контроля разности напряжений КН и устройство для подгонки частоты, состоящее из двух реле скольжения — ПЧ и УЧ, подающих команду соответственно *Прибавить* или *Убавить* скорость вращения включаемого генератора.

Дифференцирующий трансформатор и реле опережения РО служат для создания постоянного времени опережения момента оптимума ($\delta = 360°$), равного собственному времени включения выключателя, т. е. $t_0 = t_{в.в}$. Первичная обмотка трансформатора включена на изменяющееся во времени выпрямленное напряжение биений. Поэтому во вторичной обмотке индуктируется э. д. с., пропорциональная скорости изменения первичного тока во времени. Вторичное напряжение U_2 меняет свой знак в момент прохождения напряжения биений U_s через максимум и достигает наибольшего амплитудного значения при совпадении векторов синхронизируемых напряжений по фазе, т. е. в момент оптимума (рис. 6-12).

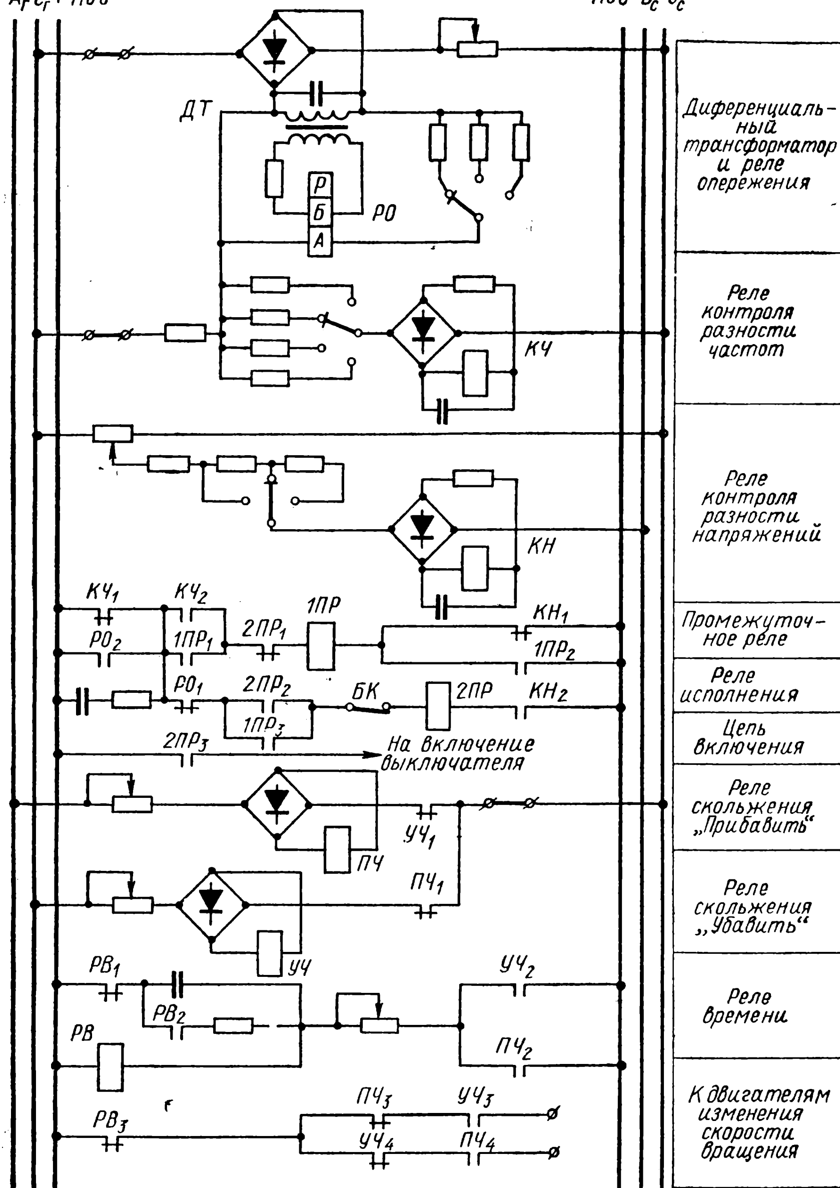


Рис. 6-11. Схема автоматического синхронизатора АСТ-4 Ленэнерго.

При равенстве синхронизируемых напряжений генератора и сети ($U_г = U_с = U$) выпрямленное напряжение биений U_s, приложенное к первичной обмотке дифференцирующего трансформатора, как и в случае синхронизатора типа АСУ, будет

$$U_s = 2U \sin \frac{\delta}{2} = 2U \sin \frac{\omega_s t}{2}.$$

Это напряжение обусловит ток в обмотке А поляризованного реле РО

$$i_{1РО} = k_1 U_s = k_1 2U \sin \frac{\omega_s t}{2}. \qquad (6.20)$$

Ток в обмотке Б этого реле, включенной во вторичную цепь трансформатора, будет

$$i_{2РО} = k_2 \frac{dU_s}{dt} = k_2 2U \frac{\omega_s}{2} \cos \frac{\omega_s t}{2}. \qquad (6.21)$$

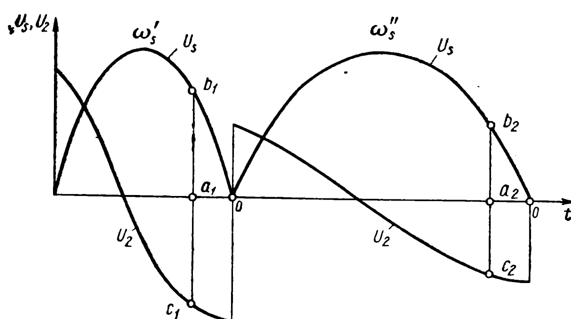


Рис. 6-12. Диаграмма к пояснению работы реле опережения.

Реле РО включено так, что оно срабатывает при равенстве токов в его обмотках, чему соответствует равенство уравнений (6.20) и (6.21). С другой стороны, поскольку реле РО срабатывает во второй половине биений (рис. 6-12), когда напряжение на обмотке Б и ток в ней имеют отрицательное значение, то равенство токов (6.20) и (6.21) запишется в виде

$$k_1 2U \sin \frac{\omega_s t}{2} = -k_2 2U \frac{\omega_s}{2} \cos \frac{\omega_s t}{2}.$$

Разделив полученное соотношение на $\cos \frac{\omega_s t}{2}$, получим

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_s t}{2} = -\frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{\omega_s}{2},$$

и поскольку при малых значениях угла δ

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_s t}{2} \cong \frac{\omega_s t}{2}$$

то

$$\frac{\omega_s t}{2} = -\frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{\omega_s}{2},$$

откуда

$$t = -\frac{k_2}{k_1} = \text{const},$$

т. е. время t, соответствующее моменту срабатывания реле РО, постоянно по величине и отрицательно. Это означает, что реле срабатывает с одинаковым опережением оптимума и что это срабатывание происходит в зоне отрицательных значений угла δ, т. е. до того, как угол δ достигнет значения 360°. Это время опережения повторяется каждый период биений независимо от скольжения и от величины синхронизируемых напряжений, что иллюстрируется также на рис. 6-12 равенством отрезков a_1b_1 и a_1c_1 или a_2b_2 и a_2c_2, а также отрезков a_1o и a_2o.

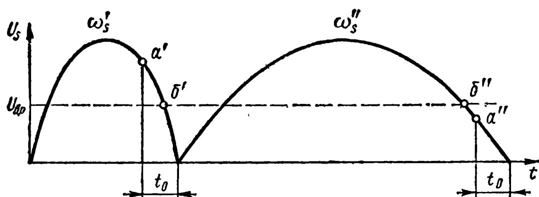


Рис. 6-13. Иллюстрация совместной работы реле опережения и реле контроля частоты.

В качестве реле контроля разности частот синхронизируемых напряжений используется поляризованное реле КЧ (рис. 6-11), включенное через выпрямитель на напряжение биений. Реле КЧ срабатывает, если напряжение на зажимах будет равно или меньше напряжения возврата $U_{в.\,р}$. Уставка реле определяется выражением

$$U_{в.р} = 2U \sin 2\pi f_{sд} t_o, \tag{6.22}$$

где U — величина синхронизируемых напряжений;

$f_{sд}$ — разность частот синхронизируемых напряжений, ниже значения которой допускается включение силового выключателя;

$t_o = t_{в.в}$ — время опережения оптимума, равное собственному времени включения выключателя.

Напряжение возврата $U_{в.\,р}$, определяемое по (6.22), выбирают из условия совместной работы реле контроля частоты КЧ и реле опережения РО (рис. 6-13). Если частота скольжения больше допустимой $f_{sд}$, то первым срабатывает на возврате реле опережения РО (точка a'), а вторым — реле контроля частоты КЧ (точка $б'$). Схема выполнена так, что в этом случае включение выключателя не разрешается. Если же частота скольжения меньше допустимой, то первым срабатывает реле КЧ (точка $б''$), а вторым — реле РО (точка a''). В этом случае включение выключателя разрешается.

Для контроля разности синхронизируемых напряжений, или, что то же, для контроля их совпадения по величине, используется поляризованное реле КН (рис. 6-11, 6-14). Напряжение биений одноименных

фаз $C_с$ и $C_г$ подается на потенциометр, со средней точки которого и от фазы B, общей для трансформаторов напряжения сети и генератора, напряжение биений подводится через выпрямитель на обмотку реле КН. При этом реле оказывается подключенным так, что при совпадении векторов синхронизируемых напряжений, т. е. при угле $\delta = 0$, к его обмотке будет приложено напряжение

$$U_{рКН} = k\sqrt{3}U_ф,$$

а при расхождении этих векторов на угол $\delta = 180°$ — напряжение $U_{рКН} = 0$.

Реле КН действует на возврате, т. е. его работа происходит при увеличении угла δ до 180°, когда напряжение $U_{рКН}$ снижается до нуля. В каждый период биений реле отпускает якорь в зоне углов δ, близких к 180°, и повторно притягивает его в зоне углов δ, близких к 360° ($U_s = 0$).

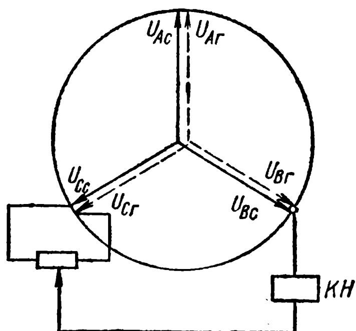


Рис. 6-14. К работе реле контроля равенства напряжений.

Работа реле КН в схеме рис. 6-11 сводится к следующему. Если разность между величинами синхронизируемых напряжений не превышает допустимого значения, то при расхождении векторов этих напряжений на угол δ, близкий к 180°, реле КН отпускает якорь и его нормально разомкнутый контакт $КН_1$ замыкается. В это же время срабатывают реле опережения РО и реле контроля частоты КЧ, которые своими контактами $РО_2$ и $КЧ_2$ включают обмотку реле 1ПР; оно срабатывает и через свои контакты $1ПР_1$ и $1ПР_2$ самоудерживается, а контактом $1ПР_3$ подготавливает цепь питания выходного реле 2ПР. Последнее должно работать только в том случае, когда частота скольжения меньше предельно допустимой (заданной), т. е. когда реле частоты КЧ отпустит свой якорь раньше (точка a'' на кривой рис. 6-13), чем это же сделает реле опережения РО (точка $б''$ на кривой).

В схеме рис. 6-11 такое действие выходного реле 2РП достигается тем, что реле 1ПР удерживается во включенном положении лишь тогда, когда размыкающийся контакт реле частоты $КЧ_1$ замыкается раньше по времени, чем разомкнется замыкающийся контакт реле опережения $РО_2$. В противном случае реле 1ПР обесточивается, цепь обмотки выходного реле 2ПР разрывается и возможность включения выключателя исключается.

Устройство подгонки частоты выполнено с помощью двух реле скольжения (ПЧ и УЧ) и одного реле времени РВ.

Реле скольжения включены таким образом, что при скорости вращения синхронизируемого генератора, меньшей таковой эквивалентного генератора системы, за время каждого периода биения первым срабатывает реле ПЧ. В результате этого механизму изменения скорости вращения подается командный импульс *Прибавить*.

При скорости вращения включаемого генератора, большей скорости вращения эквивалентного генератора системы, за время каждого периода биений первым будет работать реле УЧ. В этом случае будет подаваться командный импульс *Убавить* скорость вращения.

Продолжительность командных импульсов ограничивается с помощью реле времени РВ.

В последнее время начал применяться разработанный в НИИ электротехнической промышленности новый синхронизатор типа АС-1Т с постоянным временем опережения. Этот синхронизатор выполнен на магнитных усилителях и твердых выпрямителях, вместо ламповых устройств, и поэтому является более надежным и удобным в эксплуатации.

В синхронизаторе типа АС-1Т, построенном в основном на тех же принципах, что и синхронизаторы типа АСУ, исключен орган уравнивания напряжения, поскольку считается, что широкое применение автоматических регуляторов напряжения в современных энергосистемах обеспечивает достаточно стабильный уровень напряжения и что включение на параллельную работу с неравенством напряжений до 10% является допустимым. Этот синхронизатор также имеет три уставки времени опережения. Схема синхронизатора и ее описание приведены в литературе [6-4, 6-8].

Если расчетное время опережения для синхронизаторов с постоянным временем опережения выбирать в предположении, что выключатель (включая привод) и синхронизатор не имеют погрешностей, то расчетный угол опережения

$$\delta_р = \omega_{sр}(t_{в.в} + t_с) = \omega_{sр} t_р, \qquad (6.23)$$

где $\omega_{sр}$ — расчетная угловая скорость скольжения;
$t_{в.в}$ — время включения выключателя (включая привод);
$t_с$ — время работы синхронизатора.

В действительности и выключатель, и синхронизатор имеют определенные погрешности $\Delta t_{в.в}$ и $\Delta t_с$. Поэтому фактический угол опережения $\delta_ф$ будет отличаться от угла опережения, определяемого по формуле (6.23), и выключатель включится не в момент оптимума, а при наличии некоторого угла ошибки

$$\delta_0 = \delta_р - \delta_ф.$$

Этот угол ошибки будет еще больше, если учитывать, что угловая скорость скольжения в течение времени $t_{в.в}$ не постоянна, а имеет место некоторое ускорение.

Учитывая сказанное, суммарную погрешность в работе синхронизатора с постоянным временем опережения практически принято оценивать временем $\Delta t_с' \approx 0{,}1 t_{в.в}$. При этом угол ошибки включения

$$\delta_0 = \omega_{sр}(\Delta t_{в.в} + \Delta t_с')$$

и расчетная угловая скорость скольжения

$$\omega_{sp} = \frac{\delta_0}{\Delta t_{в.в} + \Delta t'_с}, \tag{6.24}$$

где δ_0 — в радианах.

Поскольку практически угловая скорость скольжения дается в процентах от скольжения, а угол в электрических градусах, то, учитывая, что скольжение

$$s\% = \frac{\omega_{sp}}{\omega_s} 100 = \omega_{sp*} \cdot 100 = \frac{\omega_{sp}}{314} 100$$

и угол

$$\delta_0 = \frac{2\pi}{360} \delta_{о.\ эл.\ град} = \frac{\delta_{о.\ эл.\ град}}{53,7},$$

выражение (6.24) преобразуется следующим образом:

$$\omega_{sp} = s\% \frac{314}{100},$$

откуда

$$s\% = \omega_{sp} \frac{100}{314} = \frac{\delta_0}{\Delta t_{в.в} + \Delta t'_с} \cdot \frac{100}{314} = \frac{\delta_{о.\ эл.\ град}}{(\Delta t_{в.в} + \Delta t'_с)57,3} \cdot \frac{100}{314} =$$

$$= \frac{\delta_{о.\ эл.\ град}}{180(\Delta t_{в.в} + \Delta t'_с)}. \tag{6.25}$$

Пример 3. *Дано*: 1. Турбогенератор мощностью 50 000 кВт; $\cos\varphi = 0,8$; $E'_d = U_г = 1$; $I_н = 1$; $x'_d = 0,2$; $x''_d = 0,135$ включается на параллельную работу с системой с приведенными к напряжению и мощности генератора величинами $U_с = 1$; $x'_{dс} = 0,2$; $x''_{dс} = 0,15$.

2. Приведенное к мощности генератора сопротивление связи $x_{св} = 1$. Сопротивление системы с учетом сопротивления связи в переходном режиме $x_с = x'_{dс} + x_{св} = 0,2 + 1 = 1,2$.

3. Допустимый уравнительный ток $i''_{ур} = \sqrt{2} \cdot I_н = \sqrt{2} \cdot 1 = \sqrt{2}$, т. е. эффективное значение уравнительного тока не должно превышать номинальный ток генератора.

4. Время включения генераторного выключателя, включая привод, $t_{в.\ в} = 0,5$ с. Погрешность включения выключателя (разброс во времени) составляет 10%, т. е. $\Delta t_{в.\ в} = 0,05$ с. Погрешность в действии синхронизатора типа АСУ принимается $\Delta t'_с = 0,1 \cdot t_{в.\ в} = 0,1 \cdot 0,5 = 0,05$ с.

5. Постоянная инерции вращающихся частей турбины и генератора $T_j = 6$ с.

Требуется: 1. Выбрать время опережения t_0 в синхронизаторе типа АСУ для синхронизации с системой турбогенератора на холостом ходу.

2. Проверить устойчивость синхронизации. Определить предельное значение угла $\delta_{пр}$ относительного смещения роторов и определить толчок уравнительной мощности при этом угле.

Решение. Заводу-изготовителю должна быть задана отпайка от сопротивления R (рис. 6-10, *б*), соответствующая времени опережения оптимума $t_{оп} = t_{в.\ в} = 0,5$ с.

Допустимый угол ошибки включения определяем из выражения (6.1) с учетом требования $i''_{ур} = \sqrt{2}$:

$$\sin\frac{\delta_0}{2} = i''_{ур} \frac{x''_d + x_{св} + x''_{dс}}{\sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2 \cdot E''_d} = \sqrt{2} \cdot \frac{0,135 + 1,0 + 0,15}{\sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 2,0 \cdot 1,0} = 0,357.$$

Этому значению соответствует угол $\frac{\delta_0}{2} = 20^\circ\,55'$, откуда угол ошибки, т. е. угол, при котором произойдет замыкание контактов выключателя,

$$\delta_0 = 2 \cdot 20^\circ\,55' = 41{,}83 \text{ эл. град.}$$

По формуле (6.25) определяем допустимую угловую скорость скольжения, выражаемую через скольжение в процентах для синхронизатора с постоянным временем опережения:

$$s\% = \frac{\delta_0}{180\,(\Delta t_{\text{в. в}} + \Delta t'_{\text{с}})} = \frac{41{,}83}{180\,(0{,}05 + 0{,}05)} = 2{,}32\%.$$

Предельный угол $\delta_{\text{пр}}$ относительного смещения ротора генератора и эквивалентного генератора системы находим по формуле (6.10)

$$\cos\delta_{\text{пр}} = \cos\delta_0 - 157\,(x'_d + x_{\text{с}})\,T_j\left(\frac{s\%}{100}\right)^2 =$$

$$= \cos 41^\circ\,15' - 157\,(0{,}2 + 1{,}2)\,6{,}0\left(\frac{2{,}32}{100}\right)^2 = 0{,}036 > -1,$$

откуда

$$\delta_{\text{пр}} = 87^\circ\,55' < 180^\circ,$$

т. е. условие устойчивости синхронизации удовлетворяется.

Толчок уравнительной мощности в относительных единицах при $\delta_0 = \delta_{\text{пр}}$ определяем по формуле (6.8), пренебрегая ее реактивной составляющей:

$$S'_{\text{ур}} \approx \frac{U_{\text{с}}^2}{x'_{d\text{р}}}\sin\delta_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{с}}^2}{x'_d + x_{\text{с}}}\sin\delta_{\text{пр}} = \frac{1{,}0}{0{,}2 + 1{,}2}\sin 87^\circ\,55' = 0{,}713.$$

Глава седьмая

РАСЧЕТ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как известно, способ самосинхронизации заключается в том, что невозбужденный генератор первичным двигателем разворачивается примерно до синхронной скорости и включается в сеть. Сразу же после включения генераторного выключателя автоматически подается возбуждение и генератор входит в синхронизм.

Включение генераторов по способу самосинхронизации имеет преимущества перед способом точной синхронизации, а именно:

1. Простота включения. При этом практически исключается возможность ошибочного включения.

2. Быстрота включения. Время включения определяется лишь временем развертывания генератора и собственным временем включе-

ния выключателя и АГП, что весьма важно при включении генератора в аварийных условиях.

3. Простота автоматизации процесса включения генератора.

4. Возможность включения генераторов на параллельную работу при значительных понижениях напряжения и частоты в системе. В литературе известен, например, случай включения по способу самосинхронизации турбогенератора 50 МВт; 10,5 кВ; 1500 об/мин при напряжении (0,5 ÷ 0,6) $U_н$ и частоте около 35 Гц на параллельную работу с генератором такой же мощности.

5. При способе самосинхронизации можно применять автоматическое повторное включение блока генератор — трансформатор — линия, когда мощность электростанции выдается в систему по одной линии электропередачи. Осуществляется это так. При отключении линии связи отключаются автоматы гашения поля на генераторах электростанции, затем производится повторное включение линии вместе с генераторами и вновь включается АГП.

6. При самосинхронизации особенно упрощается включение генераторов, не имеющих регуляторов скорости и дистанционного привода выключателей.

7. Упрощается автоматизация процесса пуска и включения в сеть синхронных компенсаторов.

Недостатки способа самосинхронизации:

1. Неизбежный толчок тока, возникающий в статоре в момент включения невозбужденного генератора на напряжение сети.

2. Понижение напряжения в сети в момент включения генератора.

К самосинхронизации предъявляются следующие требования:

1) генератор должен надежно втягиваться в синхронизм;

2) величина толчка уравнительного тока не должна превышать 3,5-кратного значения номинального тока включаемого генератора;

3) снижение напряжения на шинах в момент самосинхронизации генератора не должно нарушать нормальной работы потребителей.

При невозможности выполнения этих требований должна применяться точная автоматическая синхронизация.

Для удовлетворения первого из этих требований, т. е. для надежного втягивания генератора в синхронизм, стремятся создать условия, чтобы:

а) скорость вращения генератора в момент включения его в сеть не отличалась от синхронной больше, чем на 5%;

б) ускорение генератора было возможно меньше. Для гидрогенераторов без успокоительных обмоток величина максимально допустимого ускорения, как правило, не должна превышать 0,5—1,0 Гц/с. Для турбогенераторов и гидрогенераторов с успокоительной обмоткой благодаря большому асинхронному моменту (при скольжении 0,3÷0,4 момент $M_{ас} \approx M_н$) обеспечивается вхождение генератора в синхронизм при всех ускорениях, обычно допускаемых по условиям пуска первичного двигателя;

в) вслед за включением статора в сеть быстро включалось возбуждение генератора. Возбуждение обычно включается при помощи реле, срабатывающего сразу же после включения статора генератора.

РАСЧЕТ ТОКА СТАТОРА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫВОДАХ ГЕНЕРАТОРА В МОМЕНТ ВКЛЮЧЕНИЯ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

При работе нескольких турбогенераторов на шины генераторного напряжения расчет броска уравнительного тока статора можно выполнить в относительных единицах по формуле

$$I = \frac{1{,}05U_н}{x'_d + x_с} \leqslant 3{,}5, \quad (7.1)$$

где $U_н$ — номинальное напряжение генератора в относительных единицах;

x'_d — относительное переходное реактивное сопротивление генератора;

$x_с$ — приведенное к мощности генератора относительное реактивное сопротивление сети до выводов генератора.

Если неравенство (7.1) соблюдается, то рассматриваемые турбогенераторы, работающие на шины генераторного напряжения, можно включить по способу самосинхронизации.

Расчет тока по формуле (7.1), т. е. по переходному реактивному сопротивлению генераторов x'_d, а не по сверхпереходному x''_d, объясняется тем, что, как это выяснилось в результате проведенных испытаний [7-1], из-за кратковременности прохождения сверхпереходный ток не сказывается на деформации обмотки статора. По формуле (7.1) определяется периодическая составляющая тока.

В выражении (7.1) величина переходного реактивного сопротивления турбогенератора является паспортной и обычно равной $x'_d = 0{,}18 \div 0{,}25$.

Величина же реактивного сопротивления сети $x_с$ должна быть определена в каждом конкретном случае путем трансфигурации схемы замещения системы, составленной с учетом переходных реактивных сопротивлений генераторов системы, приведенных к мощности включаемого генератора.

При $U_н = 1$ можно пользоваться вытекающим из формулы (7.1) более простым соотношением

$$x'_d + x_с \geqslant 0{,}3. \quad (7.2)$$

Для крупных вертикальных гидрогенераторов, имеющих переходное сопротивление

$$x'_d = 0{,}27 \div 0{,}30,$$

а также для первой серии вертикальных гидрогенераторов завода «Уралэлектроаппарат», имеющих переходное реактивное сопротивление

$$x'_d = 0{,}25 \div 0{,}4,$$

соотношение (7.2) удовлетворяется при всех практически возможных значениях реактивности сети $x_с$. Оно так же удовлетворяется во всех случаях для турбо- или гидрогенераторов, работающих в блоке с трансформатором, а также в блоке с трансформатором и линией. В соответ-

ствии с решением Технического управления МЭС [7-2] способ самосинхронизации рассматривается как нормальный способ включения на параллельную работу:

а) для всех гидрогенераторов и синхронных компенсаторов независимо от схемы их присоединения к шинам станции или подстанции;

б) для всех турбогенераторов, работающих по схеме блока с повышающими трансформаторами.

Исключение составляют турбогенераторы мощностью до 3 тыс. кВт включительно, которые можно [7-3] включать по способу самосинхронизации независимо от схемы присоединения генератора к сборным шинам станции и величины кратности тока включения.

В аварийных условиях рекомендуется способом самосинхронизации включать все гидро- и турбогенераторы и синхронные компенсаторы, независимо от кратности тока статора в момент включения.

Заметим, что включение турбогенераторов методом самосинхронизации имеет меньший эффект, чем включение гидрогенераторов, ветроагрегатов или агрегатов с приводом от двигателей внутреннего сгорания, так как здесь для включения агрегата требуется значительное время на прогрев частей паровой турбины. Поэтому включение турбогенераторов методом самосинхронизации применяется либо для ускорения включения уже разогретой машины, либо в сочетании АПВ с самосинхронизацией генераторов, т. е. при включении генераторов по схеме АПВС.

Напряжение на выводах генератора в момент его включения оказывается сниженным и равным

$$U_г = Ix'_d, \qquad (7.3)$$

где I — ток, определяемый по формуле (7.1).

В соответствии с третьим требованием, предъявляемым к самосинхронизации, напряжение $U_г$ должно быть как можно выше, что возможно только при увеличении тока I. Но величина его не может превышать допустимые по формуле (7.1) значения. Таким образом, второе и третье требования — противоречивые. Малые и недопустимые с точки зрения потребителей напряжения $U_г$ могут получаться при весьма благоприятных значениях броска тока I и наоборот. Поэтому при наличии потребителей генераторного напряжения необходимо учитывать не только бросок тока включения, приводящий к деформации обмотки генератора, но и допустимость снижения напряжения с точки зрения питания потребителей. Величина допустимого снижения напряжения не может быть заранее указана, так как эта величина зависит в каждом конкретном случае не только от параметров системы, но и от характера нагрузок.

На основании опыта эксплуатации очень часто считают, что в условиях нормальной работы системы снижение напряжения в момент включения генератора не сказывается на работе потребителей (ввиду быстрого восстановления напряжения, чему в значительной степени способствуют устройства автоматического регулирования возбуждения). Но это не означает, что расчет напряжения по выражению (7.3) не нужно делать. В случае включения на параллельную работу

способом самосинхронизации двух генераторов без системы бросок тока

$$I = \frac{1{,}05U_н}{x'_d + x_c} = \frac{1{,}05U_н}{2x'_d} \qquad (7.4)$$

может быть вполне допустим, а напряжение на шинах может оказаться чрезвычайно низким для потребителей.

Вследствие снижения напряжения в момент самосинхронизации двигатели могут также отключаться защитой от понижения напряжения. Поэтому при внедрении самосинхронизации необходимо или вводить в защиту минимального напряжения выдержку времени, или же демонтировать эту защиту на всех двигателях ответственного назначения, в том числе и на двигателях с фазным ротором. В последнем случае должен быть обеспечен самозапуск всех двигателей ответственного назначения после отключения коротких замыканий.

Обеспечение самозапуска заключается в том, что двигатели, снизившие во время короткого замыкания свои обороты, не отключаются защитой и при восстановлении напряжения саморазворачиваются до нормального числа оборотов без пусковых устройств. На основании опыта эксплуатации доказано, что самозапуск допустим не только для короткозамкнутых асинхронных двигателей, но и для двигателей с фазным ротором [7-4].

ВЫБОР СХЕМ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ

Применяемые до настоящего времени схемы самосинхронизации, разработанные различными энергосистемами, основаны либо на контроле частоты подключаемого генератора, либо на контроле разности частот подключаемого генератора и сети. При этом частоту, разность частот генератора и сети контролируют самыми разнообразными способами [7-5], обусловленными наличием и особенностями оборудования и приборов на электростанции или в системе.

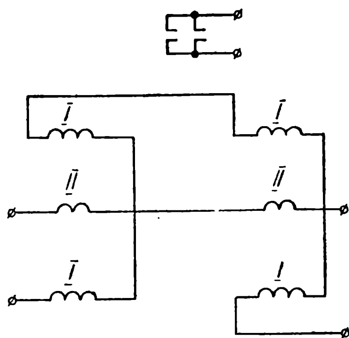


Рис. 7-1. Индукционное реле разности частот типа ИРЧ-01.

В целях унификации устройств и осуществления типовых схем самосинхронизации ВНИИЭ было проведено исследование возможности использования в качестве источника напряжения невозбужденного генератора его остаточного напряжения и применительно к этому разработано реле разности частот типа ИРЧ-01. Это реле выполнено на основе индукционного реле мощности с цилиндрическим ротором и имеет две обмотки. На обмотку *I* (рис. 7-1) подается напряжение от трансформатора напряжения системы (шины станции), а на обмотку *II* — остаточное напряжение генератора через генераторный трансформатор напряжения.

Разработанные ВНИИЭ типовые схемы самосинхронизации с использованием остаточного напряжения генератора и реле ИРЧ-01 основаны на контроле разности частот подключаемого генератора и сети. Схемы самосинхронизации подразделяются на ручные, полуавтоматические и автоматические. При ручной самосинхронизации подравнивание частоты и включение выключателя генератора производится эксплуатационным персоналом, а включение АГП — автоматически. При полуавтоматической самосинхронизации только подравнивание частоты производится персоналом станции, а включение генераторного выключателя и включение АГП — автоматически. При автоматической самосинхронизации подравнивание частоты, включение генераторного выключателя и включение АГП производятся автоматически.

В схемах ручной и полуавтоматической самосинхронизации используется один комплект устройств для включения нескольких генераторов. В схемах автоматической самосинхронизации, которые разработаны ВНИИЭ только для гидрогенераторов, применяется комплект устройств самосинхронизации для каждого генератора в отдельности.

Для ручной самосинхронизации ВНИИЭ рекомендует следующие схемы [7-6]:

1) схему ручной самосинхронизации с использованием для контроля частоты генератора и сети двойного вибрационного или стрелочного частотомера ДЧ с пределами измерения желательно от 42 до 52 Гц. Одна из систем частотомера подключается к трансформатору напряжения системы, а другая — к выходным зажимам стабилизатора напряжения СН, входные зажимы которого подключены к трансформатору напряжения синхронизируемого генератора;

2) схему ручной самосинхронизации с реле разности частот типа ИРЧ-01, действующую на сигнал. Эта схема разработана для генераторов с выключателями, не имеющими дистанционного привода.

Для выключателей с дистанционным приводом и при наличии реле ИРЧ-01 более целесообразно применять схему полуавтоматической самосинхронизации. Для автоматической самосинхронизации гидрогенераторов в качестве типовой ВНИИЭ рекомендует схему с реле разности частот ИРЧ-01 при пуске агрегата по сниженной разгонной характеристике. Для гидрогенераторов мощностью не более 5—10 тыс. кВА, имеющих успокоительную обмотку, могут применяться схемы с реле скорости, также разработанные ВНИИЭ.

Для полуавтоматической самосинхронизации рекомендуется разработанная ВНИИЭ совместно с Теплоэлектропроектом типовая схема с реле разности частот ИРЧ-01 (рис. 7-2). Кроме реле ИРЧ-01 в схеме использованы промежуточные реле РП типа ЭП-101/А, а также импульсное реле РИ, представляющее собой электромагнитное реле автоматики типа РЭ-183/1а с замедлением на размыкание контактов. Импульсное реле введено в схему для того, чтобы подача импульса на включение выключателя генератора и АГП была кратковременной, чем исключается перегорание отключающих катушек при совпадении подачи импульса на включение с действием релейной защиты на отключение генератора. Реле РИ в схему синхронизации можно не вво-

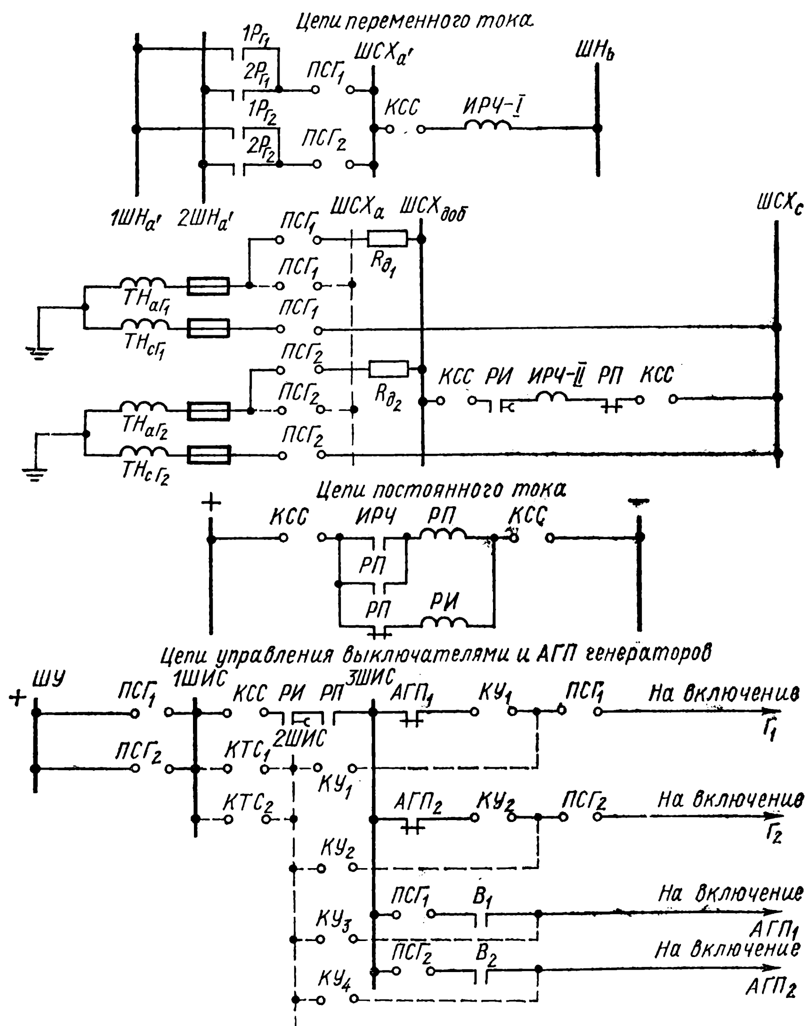


Рис. 7-2. Схема полуавтоматической самосинхронизации с реле разности частот ИРЧ-01:

$1ШН_{a'}$, $2ШН_{a'}$ — шинки напряжения фазы *а* от трансформатора напряжения первой и второй систем шин; $ШСХ_{a'}$ — синхронизационная шинка напряжения фазы *а* от трансформатора напряжения первой или второй системы шин; $ШН_в$ — шина напряжения средней точки (фаза *в*) трансформаторов напряжения первой и второй систем шин; $ШСХ_a$, $ШСХ_c$ — синхронизационные шинки напряжения фаз *а* и *с* от трансформаторов напряжения генераторов; $ШСХ_{доб}$ — добавочная синхронизационная шинка напряжения фазы *а* от трансформаторов напряжения генераторов; 1ШИС, 2ШИС, 3ШИС — шинки синхронизации; $1Р_{Г_1}$, $2Р_{Г_1}$, $1Р_{Г_2}$, $2Р_{Г_2}$ — блок-контакты шинных разъединителей генераторных выключателей; $КТС_1$, $КТС_2$ — ключи ручной точной синхронизации; КСС — ключ самосинхронизации на два положения: *Отключено* и *Включено*; $ПСГ_1$, $ПСГ_2$ — индивидуальные переключатели синхронизации генераторов № 1 и № 2 на два положения: *Отключено* и *Включено*, служащие для подключения к шинкам синхронизации соответствующих цепей напряжения включаемого генератора и шин; $КУ_1$, $КУ_2$, $КУ_3$, $КУ_4$ — ключи управления выключателями и АГП генераторов № 1 и № 2.

дить, если в схемах управления выключателя генератора и АГП предусмотрено импульсное действие.

В схеме рис. 7-2 предусмотрена возможность включения генераторов в сеть как с помощью полуавтоматической самосинхронизации, для чего используются дополнительно три шинки ($ШСХ_{доб}$, 1ШИС и 3ШИС), так и с помощью ручной точной синхронизации, для чего предусмотрены ключи ручной точной синхронизации КТС-1 и КТС-2. Цепи ручной точной синхронизации показаны на схеме штриховой линией.

При полуавтоматической самосинхронизации соблюдается следующая последовательность операций, выполняемых дежурным персоналом станции.

Прежде всего отключают АГП включаемого генератора и путем воздействия на электродвигатель регулирования скорости ЭРС перемещают механизм регулирования скорости турбины МРС в положение, при котором скорость вращения агрегата на 0,5—1,0% выше номинальной. Получив из машинного зала сигнал о том, что скорость вращения генератора достигла указанного значения, и убедившись по показаниям вольтметра, что процесс гашения поля закончен (стрелка вольтметра — вблизи нуля), включают сначала ключ схемы самосинхронизации КСС, а затем и ключ включаемого генератора ПСГ.

При включении ключей КСС и ПСГ на схему самосинхронизации подается оперативный ток, а на шинки $ШСХ_a$, $ШН_b$, $ШСХ_{доб}$ и $ШСХ_c$ — напряжение от трансформаторов напряжения генератора и шин станции.

Получив питание, импульсное реле срабатывает и замыкает свои замыкающие контакты в цепи управления, подготавливая цепь включения выключателя генератора, и в цепи обмотки *II* реле ИРЧ. Если при этом разность частот генератора и сети равна или меньше уставки реле ИРЧ, то последнее сразу же сработает. В противном случае для срабатывания этого реле дежурный должен подогнать частоту генератора к частоте сети нажатием кнопки МРС *Убавить*.

При срабатывании реле ИРЧ замыкает свой контакт в цепи питания реле РП; одним своим контактом оно замыкает цепь на самопитание, другим — разрывает цепь импульсного реле, третьим — разрывает цепь обмотки *II* реле ИРЧ, а четвертым — замыкает цепь включения выключателя соответствующего генератора.

После включения выключателя с помощью его блокконтактов $В_1$ или $В_2$ сразу же включается АГП и подается возбуждение соответствующему генератору. По истечении замедления импульсного реле, достаточного для надежного включения выключателя и АГП, его контакты размыкаются и разрывают цепь включения выключателя и АГП и цепь питания обмотки *II* реле ИРЧ.

После окончания процесса самосинхронизации и принятия нагрузки на генератор ключи КСС и ПСГ устанавливаются в положение «Отключено»; при этом напряжение с устройства самосинхронизации снимается.

Пример. *Дано:* параметры станции и системы приведены на рис. 7-3. Реактивность системы $x = 1{,}1$ определена с учетом переходных реактивностей x'_d всех

генераторов системы и приведена к мощности $P_с = 300$ МВт. При этом принят максимальный режим работы, т. е. параллельно работают все генераторы системы.

Требуется: 1. Выяснить возможность самосинхронизации турбогенератора $Г_1$, работающего параллельно с генераторами системы.

2. Выбрать схему самосинхронизации с учетом возможности использования реле разности частот ИРЧ, а также с учетом того, что генераторный выключатель имеет дистанционный привод.

Решение. Приводим все реактивности к базисной мощности, равной номинальной мощности $P_{г_1}'$ синхронизируемого генератора станции.

Реактивность системы

$$x_б = x\frac{P_{н.\,г}}{P_с} = 1,1\,\frac{25}{300} = 0,092.$$

Реактивности трансформаторов $Тр_1$ и $Тр_2$ при коэффициенте мощности генератора $Г_1$, равном 0,8,

$$x_{Тр} = 0,105\,\frac{\frac{25}{0,8}}{31,5} = 0,104.$$

Реактивность реактора при номинальном токе генератора

$$I_{н.\,г} = \frac{25}{\sqrt{3}\cdot 10,5} = 1,375\ кА$$

будет

$$x_р = \frac{x\%}{100}\cdot\frac{I_{н.\,г}}{I_{н.\,р}}\cdot\frac{U_р}{U_{н.\,г}} = 0,08\cdot\frac{1,375}{1,1}\cdot\frac{10}{10,5} = 0,095.$$

Реактивности генераторов $Г_1$ и $Г_2$ остаются неизменными, т. е.

$$x_d' = 0,21.$$

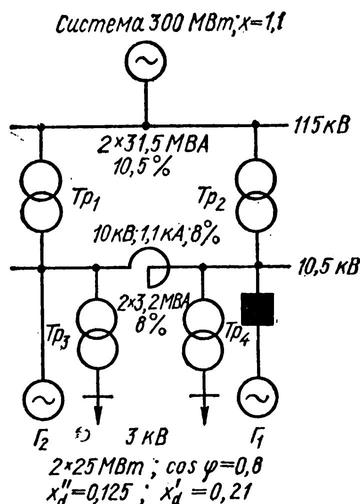


Рис. 7-3. Схема работающей на систему электростанции, включение генераторов которой намечается производить по способу самосинхронизации.

Преобразуем треугольник LMN (рис. 7-4, *а*) в звезду, при этом

$$x_L = \frac{0,104\cdot 0,104}{0,104+0,104+0,095} = 0,036;$$

$$x_M = x_N = \frac{0,104\cdot 0,095}{0,303} = 0,033.$$

Реактивности

$$x_б + x_L = 0,092 + 0,036 = 0,128;$$

$$x_{г_2} + x_M = 0,21 + 0,033 = 0,243.$$

Тогда реактивность со стороны системы и генератора $Г_2$ до шин синхронизируемого генератора $Г_1$, т. е. расчетная реактивность сети

$$x_с = \frac{0,128\cdot 0,243}{0,128+0,243} + 0,033 = 0,117,$$

следовательно, сумма сопротивлений

$$x_d' + x_с = 0,21 + 0,117 = 0,328.$$

Отсюда в соответствии с выражением (7.1) величина периодической составляющей броска тока включения в относительных единицах

$$I = \frac{1{,}05U_{н}}{x_d' + x_c} = \frac{1{,}05 \cdot 1{,}0}{0{,}328} = 3{,}2 < 3{,}5,$$

следовательно, рассматриваемый генератор с точки зрения броска тока может быть включен по способу самосинхронизации.

Напряжение на выводах генератора в момент его включения определяем согласно выражению (7.3)

$$U_{г} = Ix_d' = 3{,}2 \cdot 0{,}21 = 0{,}645,$$

т. е. посадка напряжения на шинах генераторного напряжения значительная.

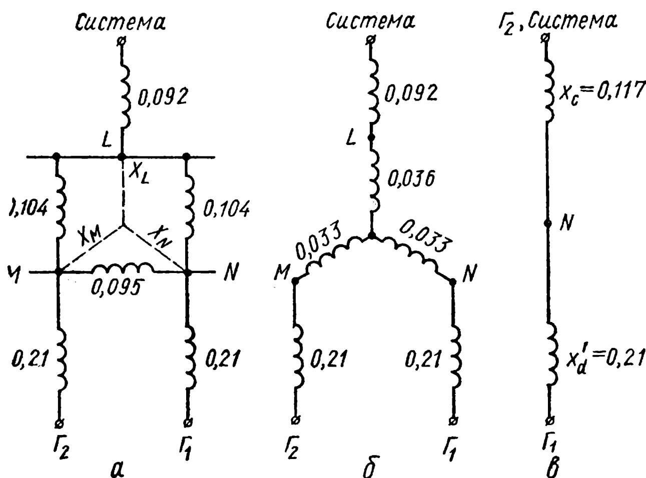


Рис. 7-4. Схема замещения электростанции и системы (рис. 7-3):

а — исходная; *б* — в процессе упрощения; *в* — упрощенная.

Попутно выясним допустимость самосинхронизации в следующих двух случаях:

1. Схема та же, что и на рис. 7-3, но отсутствует секционный реактор (при данных мощностях секций это возможно).

2. Система и секционный реактор отсутствуют, т. е. происходит самосинхронизация двух генераторов одинаковой мощности, работающих на сборные шины генераторного напряжения.

Для первого случая схема замещения системы приведена на рис. 7-5. Реактивность трансформаторов и системы

$$x_б + \frac{x_{Тр}}{2} = 0{,}092 + \frac{0{,}104}{2} = 0{,}144.$$

Реактивность со стороны системы и генератора $Г_2$ до точки N, т. е. реактивность сети

$$x_c = \frac{0{,}144 \quad 0{,}21}{0{,}144 + 0{,}21} = 0{,}086.$$

При этом

$$x_d' + x_c = 0{,}21 + 0{,}086 = 0{,}296$$

и по выражению (7.1) находим кратность

$$I=\frac{1{,}05U_{\text{н}}}{x'_d+x_{\text{с}}}=\frac{1{,}05\ \ 1{,}0}{0{,}296}=3{,}56>3{,}5.$$

Кратность тока получилась большей, чем в основном варианте (при наличии реактора), и несколько больше допустимой. В связи с этим следует отметить положительную роль секционного реактора с точки зрения допустимого значения броска тока генератора при включении. Затем определяем напряжение на выводах генератора $Г_1$ при отсутствии секционного реактора

$$U_{\text{г}_1}=Ix'_d=3{,}56\ \ 0{,}21=0{,}748,$$

т. е. падение напряжения без секционного реактора получается меньше, чем при его наличии.

Таким образом, секционный реактор необходим в схеме только для уменьшения броска тока включения.

Во втором случае, т. е. при самосинхронизации двух генераторов, изолированных от системы, реактивность сети

$$x_{\text{с}}=x'_d,$$

и тогда найденная по формуле (7.1) кратность тока

$$I=\frac{1{,}05\cdot 1{,}0}{2\cdot 0{,}21}2{,}5<3.5\ .$$

Следовательно, с точки зрения броска тока условия получаются весьма благоприятные, но зато напряжение на шинах генераторов

$$U_{\text{г}}=2{,}5\cdot 0{,}21=0{,}525,$$

что отражается на работе потребителей, подключенных к шинам.

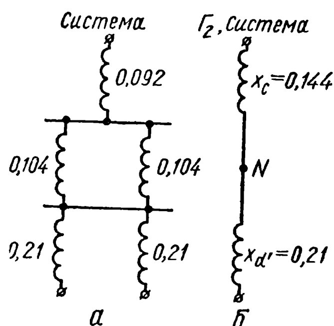


Рис. 7-5. Схема замещения электростанции и системы (рис. 7-3) без секционного реактора:
а — исходная; *б* — упрощенная.

Исходя из заданных к примеру расчета условий, наиболее подходящей оказывается схема полуавтоматической самосинхронизации (рис. 7-2).

Отметим, что в дифференциальной защите генераторов станции необходимо устанавливать быстронасыщающиеся трансформаторы. Это обусловлено тем, что при включении генераторов способом самосинхронизации в практике наблюдались случаи ложной работы дифференциальной защиты из-за токов небаланса, обусловленных броском тока включения.

Глава восьмая

РАСЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВНОГО ТРАНСФОРМАТОРА И РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ СЕКЦИИ ЧЕРЕЗ РЕАКТОР

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Требования, предъявляемые к надежности питания потребителей собственного расхода электрических станций, оказываются, как известно, более высокими по сравнению с требованиями других

потребителей электрической энергии. Повышение этой надежности достигается в значительной мере применением специальных устройств, называемых автоматическим вводом резервного оборудования (АВР).

Типовые схемы питания секций собственного расхода электростанций при питании этих секций через понижающие трансформаторы приведены на рис. 8-1. Нормально оба выключателя резервного трансформатора (3В, 4В) отключены (рис. 8-1, *а*).

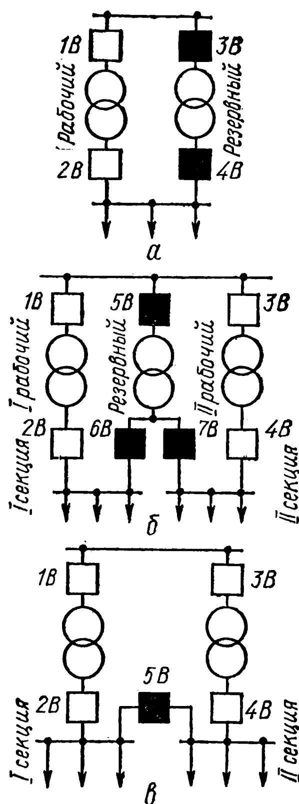


Рис. 8-1. Схемы питания секций собственного расхода электростанций:

а — при одном рабочем и одном резервном трансформаторах на секцию; *б* — при одном резервном трансформаторе на две секции; *в* — при резерве, заложенном в повышенной мощности каждого из рабочих трансформаторов.

При отключении по тем или иным причинам рабочего трансформатора устройство АВР автоматически включает выключатели резервного трансформатора и питание секции восстанавливается. Резервный трансформатор может одновременно резервировать и любой из двух рабочих трансформаторов (рис. 8-1, *б*). При отключении одного рабочего трансформатора включаются выключатели 5В и 6В резервного трансформатора, а при отключении другого рабочего трансформатора — выключатели 5В и 7В.

На рис. 8-1, *в* приведена схема резервирования питания секций шин собственного расхода без применения резервного трансформатора. Оба трансформатора являются рабочими, нормально включенными и питают каждый свою секцию шин. Каждый из этих трансформаторов рассчитан на одновременное питание нагрузок, присоединенных к обеим секциям, т. е. здесь резерв заложен в повышенной мощности самих рабочих трансформаторов. В этой схеме при отключении по той или иной причине рабочего трансформатора устройство АВР включает секционный выключатель 5В, восстанавливая этим питание потребителей секции, потерявшей напряжение.

В схемах рис. 8-1 все трансформаторы показаны включенными на общие шины генераторного напряжения. В современных установках резервные трансформаторы собственного расхода электростанций часто питаются или от других секций шин генераторного напряжения, или от шин напряжением 35 и 110 кВ. В этом случае эффективность АВР оказывается еще более высокой, так как при этом питание потребителей собственного расхода будет обеспечиваться также и при коротком замыкании на шинах генератора, и при отключении генератора от шин.

СХЕМЫ УСТРОЙСТВ АВР ТРАНСФОРМАТОРОВ

В практике эксплуатации можно встретить много схем устройств АВР трансформаторов, выполненных в зависимости от тех или иных местных условий,— схем соединения силового оборудования, типов аппаратуры и т. п. Кратко рассмотрим лишь те схемы (рис. 8-2, 8-3), которые в настоящее время являются хорошо проверенными.

Положение контактов на каждой из схем этих устройств показано для условий, когда выключатели 1В и 2В рабочего трансформатора

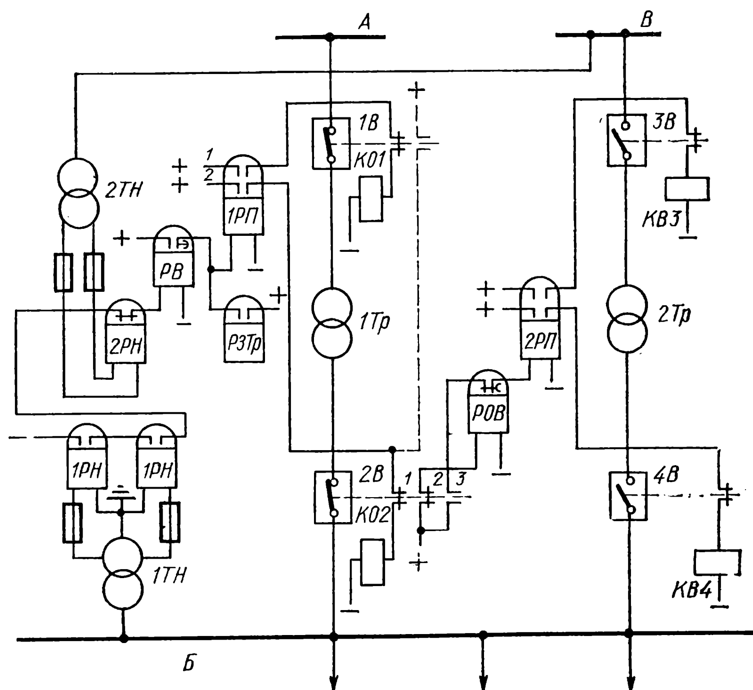


Рис. 8-2. Схема автоматического ввода резервного трансформатора с применением реле однократности включения с замедленным отпаданием якоря.

включены, а выключатели 3В и 4В резервного трансформатора отключены и, кроме того, на шинах А, Б и В имеется нормальное напряжение. Устройство АВР по этим схемам приходит в действие как при срабатывании защиты трансформатора, условно показанной здесь в виде реле РЗТр, так и при срабатывании реле минимального напряжения 1РН и реле времени РВ при исчезновении напряжения на приемных шинах Б по любым причинам.

Приведенные на рис. 8-2 и 8-3 схемы отличаются различным выполнением реле однократности включения РОВ выключателей резервного трансформатора со стороны устройства АВР. В схеме рис. 8-2 в качестве РОВ установлено реле типа РЭ Чебоксарского электроаппаратного

завода с замедленным отпаданием якоря, обеспечивающее надежное питание катушек включения выключателей 3В и 4В резервного трансформатора. После отпадания якоря РОВ реле 2РП теряет питание и держит свои контакты разомкнутыми. Поэтому отключение резервного трансформатора, например, релейной защитой не будет сопровождаться новой подачей питания на катушки включения его выключателей и повторно трансформатор не включится. Если бы

Рис. 8-3. Схема автоматического ввода резервного трансформатора с применением реле однократности включения с двумя обмотками.

реле РОВ отсутствовало и реле 2РП получало бы питание непосредственно через блок-контакт *3* выключателя 2В, то при отключенном положении выключателей 1В и 2В рабочего трансформатора и последующем отключении по любым причинам выключателей 3В и 4В резервного трансформатора цепи катушек включения снова были бы под током и выключатели 3В и 4В включились бы снова. Такое повторное включение могло бы повторяться неограниченное число раз. При наличии же РОВ такого повторного включения не происходит.

В схеме на рис. 8-3 в качестве РОВ применено обычное промежуточное реле без замедления, но с двумя обмотками. Обмотка *1* этого реле

через контакты реле 1РП включается последовательно с обмотками катушек отключения выключателей 1В и 2В рабочего трансформатора, а обмотка *2* включается последовательно с обмотками катушек включения выключателей 3В и 4В резервного трансформатора. Повторного включения резервного трансформатора не происходит, так как при включенном рабочем трансформаторе обмотка *1*РОВ питания не получает и последнее не срабатывает; его контакты остаются разомкнутыми. Поэтому при отключении резервного трансформатора катушки включения его выключателей 3В и 4В остаются обесточенными.

В схеме рис. 8-3 в замедлении РОВ нет надобности, так как после его срабатывания якорь его будет надежно самоудерживаться под влиянием появившегося тока включения катушки выключателей 3В и 4В, протекающего в обмотке 2РОВ до окончания процесса включения этих выключателей.

Реле 2РН в схемах рис. 8-2, 8-3 применяется для контроля наличия напряжения на питающих шинах резервного трансформатора. Оно позволяет предотвратить ненужное действие устройства АВР при отсутствии этого напряжения.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕЛЕ УСТРОЙСТВА АВР И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ РЕЗЕРВНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Пусть устройство АВР выполнено по схеме , приведенной на рис 8-2. Тогда замедление на отпадание якоря РОВ, выбираемое из условия надежности включения выключателя 4В резервного трансформатора, должно быть принято

$$t_{РОВ} \geqslant t_{в.\,в} + \Delta t, \qquad (8.1)$$

где $t_{в.\,в}$ — время включения выключателя с учетом привода;

Δt — время запаса, обеспечивающее надежную продолжительность импульса на включение выключателя ($\Delta t = 0{,}2 \div 0{,}3$ с).

Выдержка времени реле РВ должна быть выбрана не меньше выдержки времени $t_{р.\,з}$ релейной защиты, действующей при коротком замыкании в точке $К_1$ (до реактора) на линиях, отходящих от шин А (рис. 8-4), т. е.

$$t_{РВ_1} \geqslant t_{р.\,з} + \Delta t, \qquad (8.2)$$

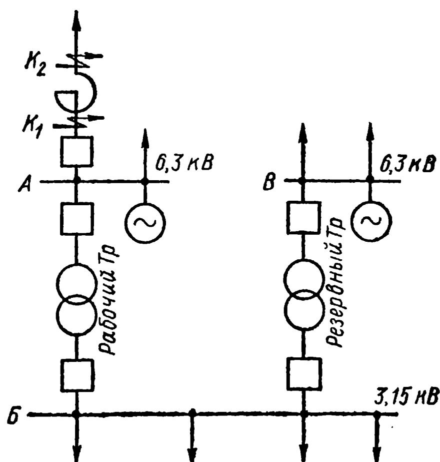


Рис. 8-4. Расчетная схема для выбора параметров настройки реле устройства АВР, выполненного по схеме, приведенной на рис. 8-2.

и не меньше времени выдержки $t_{о.\,д}$ защиты двигателей (присоединенных к шинам Б) от коротких замыканий, т. е.

$$t_{РВ} \geqslant t_{о.\,д} + \Delta t. \qquad (8.3)$$

Большее из полученных по формулам (8.2) и (8.3) значение сравнивается со временем срабатывания максимальной токовой защиты рабочего трансформатора $t_{зТр}$ и большее из них принимается в качестве расчетного времени $t_р$ подачи плюса на отключающее реле 1РП. Таким образом, можно получить

$$t_р = t_{р.\,в},$$

или

$$t_р = t_{зТр}. \tag{8.4}$$

При этом время перерыва в питании электродвигателей

$$t = t_р + t_{1РП} + t_{о.\,в} + t_{2РП} + t_{в.\,в} + \Delta t, \tag{8.5}$$

где $t_{1РП}$ и $t_{2РП}$ — время срабатывания промежуточных реле 1РП и 2РП соответственно;

$t_{о.\,в}$ и $t_{в.\,в}$ — время отключения выключателя рабочего трансформатора и время включения выключателя резервного трансформатора соответственно (с учетом привода);

Δt — время запаса, обусловленное неточностью учета других составляющих времени перерыва питания ($\Delta t = 0{,}2 \div 0{,}3$ с).

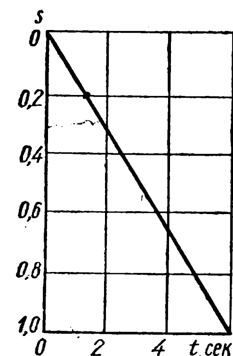


Рис. 8-5. Кривая $s = f(t)$ выбега приводимых двигателями механизмов при исчезновении напряжения (при $U = 0$).

Зная время перерыва в питании t, по кривой выбега механизмов (рис. 8-5) $s = f(t)$ можно определить скольжение s, которое будут иметь двигатели к моменту подачи на них напряжения. Зная скольжение s, по кривой электромеханических характеристик (рис. 8-6) при номинальном напряжении двигателей $U_н$ можно определить кратность пускового тока $\frac{I_{пуск.\,д}}{I_{н.\,д}}$.

Суммарный ток нагрузки двигателей при известной суммарной их мощности нагрузки $P_{\Sigma д}$ равен

$$I_{\Sigma д} = \frac{P_{\Sigma д}}{\sqrt{3}\, U_н \cos\varphi}, \tag{8.6}$$

и тогда суммарный пусковой ток двигателей на стороне низшего напряжения силового трансформатора

$$I_{\Sigma\, пуск} = \frac{I_{пуск.д}}{I_{н.д}} I_{\Sigma д}, \tag{8.7}$$

или, относя его к стороне высшего напряжения силового трансформатора, т. е. к месту установки трансформаторов тока защиты резервного трансформатора, получаем

$$I_{пуск} = I_{\Sigma пуск} \cdot \frac{U_{II}}{U_I}, \tag{8.8}$$

где U_I и U_{II} — высшее и низшее напряжения силового трансформатора.

Тогда первичный ток срабатывания защиты резервного трансформатора, определяемый из условия отстройки ее от начального тока самозапуска двигателей,

$$I_{с.з} = \frac{k_н}{k_в} I_{пуск}, \tag{8.9}$$

где $k_н$ — коэффициент надежности (для реле типа РТ $k_н = 1{,}4 \div 1{,}5$);

$k_в$ — коэффициент возврата токового реле (для реле типа РТ $k_в = 0{,}85$);

Зная коэффициент трансформации трансформаторов тока $n_т$ и коэффициент схемы $k_{сх}$, можно определить ток срабатывания реле по формуле

$$I_{ср} = \frac{k_н k_{сх}}{k_в} \cdot \frac{I_{пуск}}{n_т}. \tag{8.10}$$

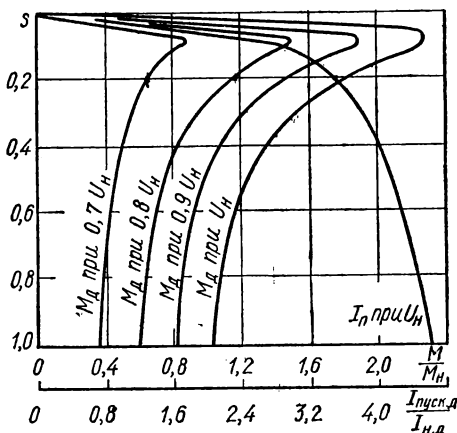


Рис. 8-6. Кривые вращающего момента и пускового тока электродвигателя.

Сопротивление всех двигателей в относительных единицах, отнесенное к номинальному току $I_{нII}$ и напряжению U_{II} трансформатора, можно получить [8-1] из соотношения

$$x_{*д} = \frac{I_{нII}}{\frac{I_{пуск}}{I_{н.д}} n I_{н.д}} \cdot \frac{U_н^2}{U_{II}^2}, \tag{8.11}$$

где $\frac{I_{пуск.д}}{I_{н.д}}$ — кратность пускового тока, определяемого по кривой рис. 8-6;

n — число двигателей.

Восстанавливающееся напряжение на двигателях, т. е. напряжение самозапуска, можно определить [8-2] по формуле

$$U_в \approx \frac{U_{II} x_{*д}}{x_{*д} + x_{*Тр}}, \tag{8.12}$$

где $x_{*Тр}$ — сопротивление трансформатора в относительных единицах.

Зная отношение восстанавливающегося напряжения $U_в$ к номинальному напряжению двигателей $U_н$, а также скольжение s, можно по кривым моментов (рис. 8-6) определить возможность самозапуска двигателей.

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения 1РН выбирают из условия несрабатывания его при коротком замыкании в точке $К_2$ (рис. 8-4), т. е. из условия

$$U_{ср\ 1РН} \leqslant \frac{U_{к.з}}{k_н} \cdot \frac{U_{II}}{U_I}, \qquad (8.13)$$

а также из условия несрабатывания его при самозапуске двигателей после восстановления их питания, т. е. из условия

$$U_{ср.\ 1РН} \leqslant \frac{U_в}{k_н}, \qquad (8.14)$$

где $U_{к.з}$ — остаточное напряжение на шинах А при коротком замыкании в точке $К_2$.

Из полученных по формулам (8.13) и (8.14) значений, отнесенных в данном случае к первичной стороне трансформатора напряжения (рис. 8-2 или 8-3), выбирается меньшее и сравнивается с номинальным напряжением рабочего источника питания $U_{н.и}$. Если полученное значение напряжения $U_{ср\ 1РН}$ не выше $0{,}25U_{н.и}$, то оно принимается окончательно. В противном случае в качестве расчетного значения этого напряжения рекомендуется принимать $U_{ср\ 1РН} = 0{,}25U_{н.и}$. Объясняется это тем, что реле 1РН в схемах рис. 8-2 и 8-3 рассматриваются характеризующими не понижение рабочего напряжения, а его исчезновение.

Напряжение срабатывания реле максимального напряжения 2РН выбирают из условия несрабатывания его при минимальном рабочем напряжении на шинах резервного трансформатора, т. е.

$$U_{ср\ 2РН} = \frac{k_в}{k_н} U_{раб.\ мин}, \qquad (8.15)$$

где $k_в = 0{,}85 \div 0{,}9$ — коэффициент возврата реле;
$k_н = 1{,}1 \div 1{,}2$ — коэффициент надежности.

Минимальное рабочее напряжение $U_{раб.\ мин}$ принимается на 10% меньше номинального напряжения на шинах высшего напряжения резервного трансформатора.

Учитывая возможные аварийные снижения напряжения резервного источника питания, определяемое по уравнению (8.15) напряжение $U_{ср\ 2РН}$ рекомендуется принимать равным не менее 60% номинального.

Пример. *Дано*: 1. Рабочий и резервный трансформаторы (рис. 8-4) питаются от секций шин А и В генераторного напряжения 6,3 кВ. Мощность каждого из трансформаторов $S_{Тр} = 3200$ кВА, реактивное сопротивление $x_{Тр} = 5\%$.

2. На трансформаторах кроме токовой отсечки с временем срабатывания $t_{оТр} = 0{,}1$ с предусмотрена максимальная токовая защита с временем срабатывания $t_{зТр} = 0{,}6$ с.

3. Время отключения выключателей $t_{о.\ в} = 0{,}15$ с, время включения выключателей $t_{в.\ в} = 0{,}25$ с.

4. Наименьшая величина остаточного напряжения на шинах 6,3 кВ, получающаяся при коротком замыкании в точке K_2 (рис. 8-4), составляет 65% его номинального значения.

5. Время срабатывания линейной токовой отсечки, действующей при коротком замыкании в точке K_1, принять $t_{р.\ з} = 0{,}15$ с.

6. К шинам 3,15 кВ подключено восемь двигателей мощностью по $P_н = 200$ кВт, $U_н = 3$ кВ, $\cos\varphi = 0{,}81$. Каждый из двигателей работает с нагрузкой, равной 90% его номинальной мощности. Момент сопротивления приводимых двигателями механизмов постоянный.

7. Электромеханические характеристики двигателей и кривые выбега механизмов приведены соответственно на рис. 8-6 и 8-5.

8. Двигатели защищены от короткого замыкания токовыми отсечками с временем срабатывания $t_{о.\ д} = 0{,}1$ с.

Требуется: 1. Составить принципиальную схему устройства автоматического ввода резервного трансформатора, питающего секцию собственного расхода электрической станции, применительно к схеме первичных соединений (рис. 8-4).

2. Рассчитать уставки устройства АВР.

3. Рассчитать уставку токовой защиты резервного трансформатора, исходя из отстройки от пускового тока двигателей.

4. Проверить возможность самозапуска двигателей, питающихся от шин 3,15 кВ.

Решение. Схема АВР может быть принята (рис. 8-2) с применением реле однократности включения типа РЭВ серийного исполнения. Так как по условию время включения выключателя резервного трансформатора $t_{в.\ в} = 0{,}25$ с, то в качестве реле однократности включения РОВ можно принять реле типа РЭВ, позволяющее получить замедление на отпадание якоря до 2 с. Время замедления этого реле определяем по равенству (8.1), принимая запас надежности $\Delta t = 0{,}25$ с. При этом получим

$$t_{РОВ} = t_{в.\ в} + \Delta t = 0{,}25 + 0{,}25 = 0{,}5 \text{ с.}$$

По выражениям (8.2) и (8.3) определяем соответственно выдержку времени реле РВ:

$$t_{РВ} = t_{р.\ з} + \Delta t = 0{,}15 + 0{,}5 = 0{,}65 \text{ с;}$$
$$t_{РВ} = t_{о.\ д} + \Delta t = 0{,}1 + 0{,}5 = 0{,}6 \text{ с.}$$

Принимаем $t_{РВ} = 0{,}7$ с.

Так как $t_{РВ} > t_{зТр}$, то расчетное время подачи плюса на реле 1РП в соответствии с равенством (8.4) будет $t_р = 0{,}7$ с. Тогда, принимая время срабатывания промежуточных реле 1РП и 2РП одинаковым и равным $t_{РП} = 0{,}05$ с, время перерыва в питании двигателей определяем по формуле (8.5)

$$t = t_р + t_{1РП} + t_{о.\ в} + t_{2РП} + t_{в.\ в} + \Delta t =$$
$$= 0{,}7 + 0{,}05 + 0{,}15 + 0{,}05 + 0{,}25 + 0{,}3 = 1{,}5 \text{ с.}$$

По кривой выбега механизмов (рис. 8-5) определяем скольжение s, которое будут иметь двигатели при перерыве в питании. При этом $s \approx 0{,}3$. Зная скольжение, по кривой характеристик (рис. 8-6) при напряжении двигателей, равном номинальному, определяем кратность пускового тока

$$\frac{I_{пуск.\ д}}{I_{н.\ д}} = 3{,}9.$$

В соответствии с заданным условием суммарная мощность нагрузки двигателей

$$P_{\Sigma д} = 0{,}9 \cdot P_н \cdot n = 0{,}9 \cdot 200 \cdot 8 = 1440 \text{ кВт,}$$

где n — число двигателей.

При этом суммарный ток нагрузки двигателей

$$I_{\Sigma д} = \frac{P_{\Sigma д}}{\sqrt{3}\,U_н \cos\varphi} = \frac{1440}{\sqrt{3}\cdot 3\cdot 0{,}81} = 342 \text{ А}.$$

Суммарный пусковой ток двигателей

$$I_{\Sigma\,пуск} = \frac{I_{пуск.\,д}}{I_{н.\,д}}\cdot I_{\Sigma д} = 3{,}9\cdot 342 = 1334 \text{ А},$$

или, относя его к высшему напряжению трансформатора, где установлена токовая защита, из уравнения (8.8) получаем

$$I_{пуск} = I_{\Sigma\,пуск}\frac{U_{II}}{U_I} = 1334\cdot\frac{3{,}15}{6{,}3} = 667 \text{ А}.$$

Тогда первичный ток срабатывания защиты трансформатора по выражению (8.9)

$$I_{с.\,з} = \frac{k_н}{k_в}\cdot I_{пуск} = \frac{1{,}45}{0{,}85}\cdot 667 \approx 1140 \text{ А}.$$

Зная коэффициент трансформации трансформаторов тока $n_т$ и коэффициент схемы $k_{сх}$, можно по уравнению (8.10) определить ток срабатывания токового реле защиты и выбрать уставку.

Сопротивление двигателя определим по уравнению (8.11)

$$x_{*д} = \frac{I_{нII}}{\frac{I_{пуск.\,д}}{I_{н.\,д}}\,nI_{н.\,д}}\cdot\frac{U_н^2}{U_{II}^2} = \frac{590}{3{,}9\cdot 8\cdot 47{,}5}\cdot\frac{3^2}{3{,}15^2} = 0{,}36,$$

где номинальный ток трансформатора

$$I_{нII} = \frac{S_{Тр}}{\sqrt{3}\,U_{II}} = \frac{3200}{\sqrt{3}\cdot 3{,}15} = 590 \text{ А},$$

а номинальный ток двигателя

$$I_{н.\,д} = \frac{P_{н.\,д}}{\sqrt{3}\,U_н\cos\varphi} = \frac{200}{\sqrt{3}\cdot 3\cdot 0{,}81} = 47{,}5 \text{ А}.$$

Восстанавливающееся напряжение на двигателях

$$U_в = \frac{U_{II}x_{*д}}{x_{*д} + x_{*Тр}} = \frac{3150\cdot 0{,}36}{0{,}36 + 0{,}05} = \frac{3150\cdot 0{,}36}{0{,}41} = 2760 \text{ В},$$

или в процентах номинального напряжения двигателей

$$U_в\,\% = \frac{2760}{3000}\cdot 100 = 92\%.$$

Зная восстанавливающееся напряжение $U_в\%$ и скольжение s, по кривым моментов (рис. 8-6) проверяем возможность самозапуска двигателей. Так как при этих данных относительный вращающий момент $\frac{M}{M_н} = 1{,}25$, а момент сопротивления приводимых двигателями механизмов равен единице, то превышение вращающего момента над моментом сопротивления, равное 25%, должно обеспечить разворот всех восьми двигателей секции собственного расхода.

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения 1РН определяем по уравнению (8.13)

$$U_{\text{ср 1РН}} = \frac{U_{\text{к. з}}}{k_{\text{н}}} \cdot \frac{U_{II}}{U_I} = \frac{0{,}65U_I}{k_{\text{н}}} \cdot \frac{U_{II}}{U_I} = \frac{0{,}65U_{II}}{k_{\text{н}}} = \frac{0{,}65 \cdot 3{,}15}{1{,}25} = 1{,}64 \text{ кВ}.$$

Напряжение срабатывания этого же реле находим по формуле (8.14)

$$U_{\text{ср 1РН}} = \frac{U_{\text{в}}}{k_{\text{н}}} = \frac{2{,}76}{1{,}25} = 2{,}2 \text{ кВ}.$$

Так как меньшее из полученных значений, т. е. 1,64 кВ, составляет больше 25% $U_{\text{н. и}} = 3{,}15$ кВ, то в качестве расчетного значения напряжения срабатывания реле 1РН принимаем окончательно величину

$$U_{\text{ср 1РН}} = 0{,}25U_{\text{н. и}} = 0{,}25 \cdot 3{,}15 = 0{,}79 \text{ кВ}.$$

Напряжение срабатывания реле максимального напряжения 2РН определяем из уравнения (8.15)

$$U_{\text{ср 2РН}} = \frac{k_{\text{в}}}{k_{\text{н}}} U_{\text{раб. мин}} = \frac{k_{\text{в}}}{k_{\text{н}}} \cdot 0{,}9U_I = \frac{0{,}85}{1{,}25} \cdot 0{,}9 \quad 6{,}3 = 3{,}85 \text{ кВ}.$$

Напряжение $U_{\text{ср 2РН}}$ отнесено к шинам 6,3 кВ. Так как это напряжение по отношению к номинальному напряжению резервного источника питания составляет

$$\frac{3{,}85}{6{,}3} \cdot 100 = 61\%,$$

т. е. свыше 60%, то его принимаем окончательно в качестве расчетного значения.

СХЕМА РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ СЕКЦИИ ЧЕРЕЗ РЕАКТОР

Разновидностей схем устройства АВР резервного питания секции собственного расхода электрических станций через реактор известно довольно много. Одна из возможных схем представлена на рис. 8-7. При исчезновении напряжения на шинах Б по любым причинам (повреждение, ошибочное отключение) срабатывают реле минимального напряжения 1РН и подают питание на реле времени РВ. Последнее, спустя заданное время выдержки, срабатывает и замыкает цепь питания катушки отключения КО выключателя 2В. При отключении выключателя 2В через контакты реле однократности включения РОВ замыкается цепь питания катушки включения КВ выключателя 4В. Последний включается и подает на шины Б напряжение от резервного источника питания.

Уставки устройства АВР выбираются следующим образом. Напряжение срабатывания реле минимального напряжения 1РН устройства АВР должно быть выбрано из условия несрабатывания его при коротком замыкании в точке K_2 за реактором наиболее мощного присоединения, отходящего от шин А (рис. 8-8), т. е. из условия

$$U_{\text{ср 1РН}} \leqslant \frac{U_{\text{к. з}}}{k_{\text{н}}}, \qquad (8.16)$$

а также из условия несрабатывания его при самозапуске двигателей после восстановления их питания:

$$U_{\text{ср 1РН}} \leqslant \frac{U_{\text{в}}}{k_{\text{н}}},$$

где $U_{\text{к. з}}$ — остаточное напряжение на шинах А при коротком замыкании в точке К_2;

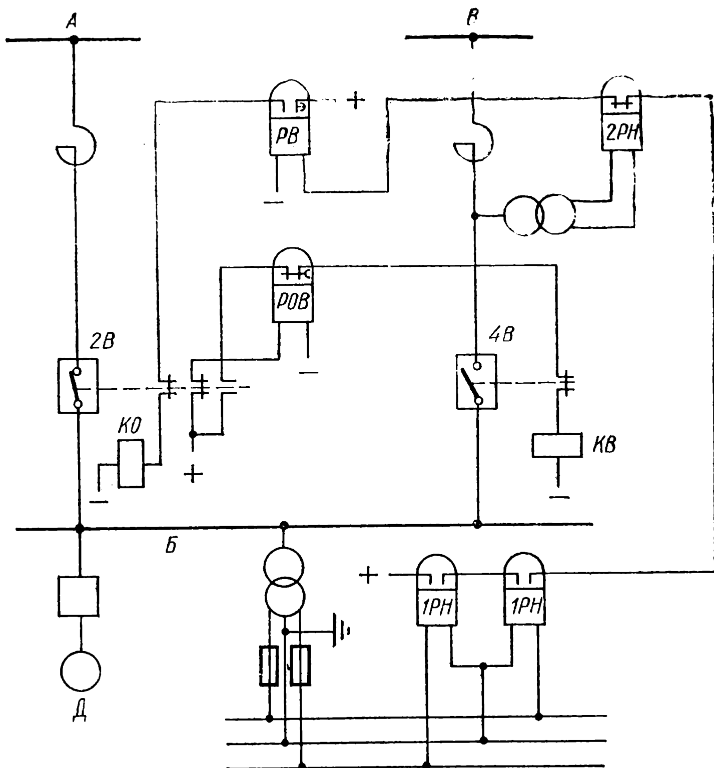


Рис. 8-7. Одна из возможных схем автоматического ввода резервного питания через реактор.

$U_{\text{в}}$ — восстанавливающееся напряжение при самозапуске двигателей;

$k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, равный 1,25.

В качестве расчетного принимается меньшее напряжение из полученных по условиям (8.16) и (8.14) значений, если оно не превышает 25% номинального рабочего напряжения источника. В противном случае в качестве расчетного значения этого напряжения рекомендуется принимать

$$U_{\text{ср 1РН}} = 0{,}25 U_{\text{н. и}},$$

где $U_{\text{н. и}}$ — номинальное напряжение рабочего источника питания.

Напряжение срабатывания реле максимального напряжения 2РН, контролирующего наличие напряжения на резервной цепи питания, выбирается из условия несрабатывания его при минимальном рабочем напряжении на шинах В резервного источника питания (рис. 8-7), т. е. из условия

$$U_{\text{ср 2РН}} = \frac{k_{\text{в}}}{k_{\text{н}}} \cdot U_{\text{раб. мин}},$$

где $U_{\text{раб. мин}}$ — минимальное рабочее напряжение, равное $0{,}9U_{\text{н. н}}$;
$k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, равный 1,1 — 1,2;
$k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата реле 2РН, равный 0,8 — 0,9.

Исходя из возможности аварийного снижения напряжения резервного источника питания, определяемое напряжение рекомендуется принимать не менее 60% номинального.

Выдержка времени реле РВ должна быть выбрана не меньше времени $t_{\text{р. з}}$ действия релейной защиты (токовой отсечки), действующей при коротком замыкании в точке $К_1$ (рис. 8-8), т. е.

$$t_{\text{РВ}} \geqslant t_{\text{р. з}} + \Delta t, \qquad (8.17)$$

и не меньше времени $t_{\text{о. д}}$ действия мгновенной защиты двигателей, присоединенных к шинам Б сборки, от коротких замыканий, т. е.

$$t_{\text{РВ}} \geqslant t_{\text{о. д}} + \Delta t. \qquad (8.18)$$

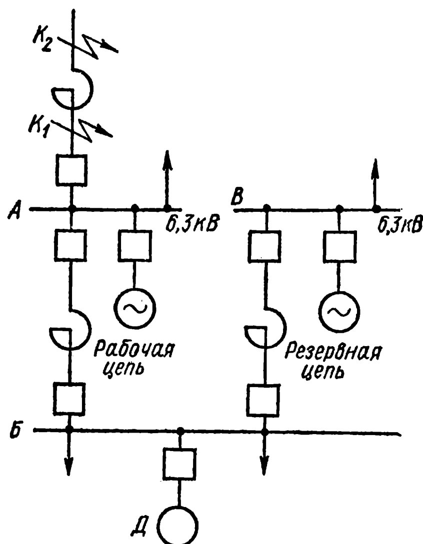


Рис. 8-8. Расчетная схема для выбора параметров настройки реле устройства АВР, выполненного по схеме, приведенной на рис. 8-7.

Большее из полученных по условиям (8.17) и (8.18) значений сравнивается с временем действия быстродействующей защиты рабочей цепи, питающей сборку Б, и большее из них принимается в качестве расчетной выдержки времени реле времени РВ.

Замедление в отпадании якоря реле однократности включения РОВ, выбираемое из условия надежности включения выключателя 4В резервного источника питания, должно быть принято

$$t_{\text{РОВ}} \geqslant t_{\text{в. в}} + \Delta t, \qquad (8.19)$$

где $t_{\text{в. в}}$ — время включения выключателя с учетом привода;
Δt — запас надежности, принимаемый равным 0,2 — 0,3 с.

РАСЧЕТ САМОЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ И ВЫБОР УСТАВОК ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЦЕПИ ПИТАНИЯ

В целях упрощения расчет самозапуска двигателей может быть выполнен, исходя из следующих допущений.

1. В качестве расчетного принимается наиболее тяжелый режим, соответствующий скольжению $s = 1$, при котором все двигатели предполагаются заторможенными до полной их остановки. Допускаемая при этом погрешность будет незначительной [8-3], так как определяющее ток самозапуска сопротивление электродвигателей в условиях АВР при скольжении $s = 0{,}15 \div 0{,}20$ мало отличается от сопротивления их при скольжении $s = 1$*.

2. Цепи, питающие сборки двигателей через трансформаторы или реакторы, принимаются подключенными к шинам источника бесконечно большой мощности, чему соответствует сопротивление источника питания (системы), равное нулю ($x_0 = 0$). Такое допущение вполне оправдано в тех случаях, когда на генераторах системы установлены устройства автоматического регулирования напряжения, дополненные устройствами форсировки возбуждения. Во время самозапуска двигателей, сопровождающегося повышенным значением реактивных токов, эти устройства поддерживают на зажимах генераторов напряжение, близкое к номинальному.

3. Полное сопротивление заторможенных электродвигателей и реактивное сопротивление трансформатора или реактора складываются арифметически. Основанием к такому допущению является то, что учет активных сопротивлений при расчете самозапуска группы двигателей через ненагруженный трансформатор или реактор практически не вносит существенных уточнений в результаты расчета [8-2].

В соответствии с принятыми допущениями расчет самозапуска электродвигателей может быть выполнен в следующем порядке.

Номинальный ток двигателя в амперах

$$I_{\text{н. д}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3}\,U_{\text{н}}\cos\varphi}. \qquad (8.20)$$

Пусковое сопротивление заторможенного электродвигателя в омах

$$z_{\text{д}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}\,I_{\text{пуск. д}}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}\,K_{\text{пуск. д}} I_{\text{н. д}}}, \qquad (8.21)$$

где $K_{\text{пуск. д}}$ — кратность пускового тока асинхронного двигателя по отношению к номинальному току.

Сопротивление двигателя, отнесенное к номинальному току реактора,

$$z'_{\text{д}} = z_{\text{д}} \frac{I_{\text{н. р}}}{I_{\text{н. д}}}. \qquad (8.22)$$

* При нормальной работе двигателя скольжения $s = s_{\text{н}} = 0{,}02 \div 0{,}04$; при затормозившихся двигателях в обычных условиях АВР скольжение $s = 0{,}15 \div 0{,}20$; при затормозившихся двигателях до полной остановки их скольжение $s = 1$.

Восстанавливающееся напряжение на зажимах двигателя [8-1]

$$U_в = U_н \frac{z'_д}{z'_д + x_р}. \qquad (8.23)$$

До недавнего времени считалось, что остаточное напряжение на зажимах двигателя, при котором обеспечивается самозапуск, $U_в \geqslant \geqslant 0{,}7\ U_н$. Однако проведенные ОРГРЭС и некоторыми энергосистемами исследования показали, что самозапуск двигателей собственного расхода электростанций высокого давления после кратковременного перерыва питания, соответствующего времени действия устройства АВР, возможен даже тогда, когда в момент самозапуска напряжение снижается до $U_в = 0{,}55\ U_н$. Продолжительность самозапуска при этом увеличивается до 30—35 с, что по условиям нагрева электродвигателей считается допустимым [8-3, 8-4]. При более длительных перерывах питания собственного расхода этих электростанций рекомендуется исходить из необходимой величины остаточного напряжения $U_в = = (0{,}65 \div 0{,}7)\ U_н$.

Зная суммарный пусковой ток всех самозапускающихся двигателей, ток срабатывания токовой защиты резервной цепи питания (трансформатор, реактор) определяем из условия отстройки ее от начального тока самозапуска двигателей:

$$I_{с.\,з} = \frac{k_н}{k_в} I_{пуск}, \qquad (8.24)$$

где $k_в$ — коэффициент возврата токового реле (для реле типа РТ равен 0,85);

$k_н$ — коэффициент надежности (для реле типа РТ равен 1,4—1,5).

Зная коэффициент трансформации трансформаторов тока $n_т$ и коэффициент схемы защиты $k_{сх}$, можно определить ток срабатывания реле

$$I_{ср} = \frac{k_н k_{сх}}{k_в} \cdot \frac{I_{пуск}}{n_т}. \qquad (8.25)$$

При включении реле на разность токов двух фаз коэффициент схемы $k_{сх} = \sqrt{3}$, а при включении на фазный ток $k_{сх} = 1$.

Пример. *Дано*: 1. Схема первичной цепи питания секции собственного расхода электростанции показана на рис. 8-9. Группа электродвигателей подключена к сборке собственного расхода, питающейся через реактор от шин источника бесконечной мощности с номинальным напряжением $U_{н.\,и} = 6{,}3$ кВ. Все двигатели работают с номинальной нагрузкой на механизмы с постоянным моментом сопротивления (компрессоры и пр.).

2. К секции подключены две группы электродвигателей. Первая группа состоит из трех двигателей типа ДАМСО с параметрами $P_{н1} = 850$ кВт, $U_н = 6$ кВ, $\cos\varphi = = 0{,}89$, кратность пускового тока номинальному

$$K_{пуск.\,д1} = \frac{I_{пуск.\,д1}}{I_{н.\,д}} = 5{,}3.$$

Вторая группа состоит из трех двигателей типа ДАМСО с параметрами $P_{н2} = 360$ кВт, $U_н = 6$ кВ, $\cos\varphi = 0{,}87$;

$$K_{пуск.\,д2} = \frac{I_{пуск.\,д2}}{I_{н.\,д}} = 4{,}5.$$

3. Реактор типа РБ6-500-8 с параметрами $U_н = 6$ кВ, $I_{н.\,р} = 500$ А, реактивность $x_р\% = 8\%$.

4. Наименьшая величина остаточного напряжения на шинах 6,3 кВ при коротком замыкании в точке K_2 за реактором наиболее мощного присоединения к шинам A (рис. 8-8) составляет 70% $U_{н.\,и}$.

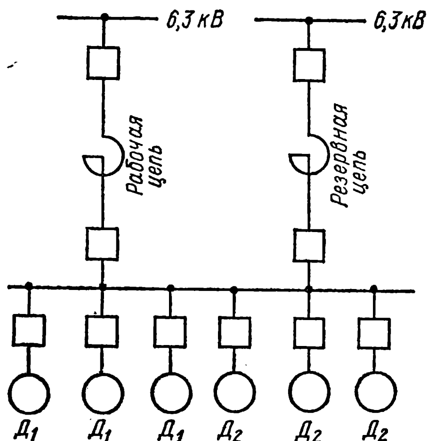


Рис. 8-9. Схема первичной цепи питания собственного расхода электростанции через реактор.

5. Время срабатывания мгновенной токовой защиты (токовой отсечки), действующей при коротком замыкании в точке K_1 (рис. 8-8), $t_{р.\,з} = 0{,}15$ с.

6. Двигатели $Д_1$, $Д_2$ (рис, 8-9) защищены токовыми отсечками с временем срабатывания $t_{о.\,д.} = 0{,}12$ с.

7. Время включения выключателя 4В (рис. 8-7) с учетом привода $t_{в.\,в} = 0{,}25$ с.

8. Реле РОВ типа РЭ-100 с возможностью регулирования замедления на отпадание якоря до 2 с.

Требуется: 1. Выбрать принципиальную схему устройства АВР резервного питания секции собственного расхода электростанции.

2. Выбрать уставки устройства АВР.

3. После включения резервного питания проверить возможность самозапуска двигателей, питающихся от секции собственного расхода.

4. Выбрать уставку токовой защиты цепи резервного питания.

Решение. В качестве схемы устройства АВР секции собственного расхода станции может быть принята схема, показанная на рис. 8-7.

Выбор уставок устройства АВР произведем после проверки условий самозапуска двигателей, когда будет известно восстанавливающееся напряжение $U_в$.

Сопротивление реактора в омах

$$x_р = x\% \frac{U_{н.\,и}}{\sqrt{3}\, I_{н.\,р} \cdot 100} = 8 \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 500 \cdot 100} = 0{,}56 \text{ Ом}.$$

Номинальный ток электродвигателя первой группы находим по формуле (8.20)

$$I_{н.\,д1} = \frac{P_{н1}}{\sqrt{3}\, U_н \cos\varphi_1} = \frac{850}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0{,}89} = 92 \text{ А}.$$

Номинальный ток электродвигателя второй группы

$$I_{н.\,д2} = \frac{360}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0{,}87} = 40 \text{ А}.$$

Пусковое сопротивление одного электродвигателя первой группы определяем по формуле (8.21)

$$z_{д1} = \frac{U_н}{\sqrt{3} \cdot K_{пуск.\,д1} I_{н.\,д1}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 5{,}3 \cdot 92} = 7{,}1 \text{ Ом}.$$

Пусковое сопротивление одного электродвигателя второй группы

$$z_{д2} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 4{,}5 \cdot 40} = 19{,}2 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление трех электродвигателей первой группы

$$z_{\Sigma\, д1} = \frac{z_{д1}}{n} = \frac{7{,}1}{3} = 2{,}37 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление трех электродвигателей второй группы

$$z_{\Sigma\, д2} = \frac{z_{д2}}{n} = \frac{19{,}2}{3} = 6{,}4 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление всех электродвигателей, подключенных к сборке,

$$z_{д.\ рез} = \frac{z_{\Sigma\, д1} z_{\Sigma\, д2}}{z_{\Sigma\, д1} + z_{\Sigma\, д2}} = \frac{2{,}37 \cdot 6{,}4}{2{,}37 + 6{,}4} = 1{,}73 \text{ Ом}.$$

Сопротивление всех двигателей, отнесенное к току реактора, с учетом формулы (8.22)

$$z'_{д.\ рез} = z_{д.\ рез} \frac{I_{н.\ р}}{3I_{н.д1} + 3I_{н.д2}} = 1{,}73 \cdot \frac{500}{3 \cdot 92 + 3 \cdot 40} = 1{,}73 \cdot \frac{500}{276 + 120} = 2{,}18 \text{ Ом}.$$

Восстанавливающееся напряжение на зажимах электродвигателей с учетом выражения (8.23)

$$U_в = U_{н.\ и} \cdot \frac{z'_{д.\ рез}}{z'_{д.\ рез} + x_р} = U_{н.\ и} \cdot \frac{2{,}18}{2{,}18 + 0{,}56} = U_{н.\ и} \cdot \frac{2{,}18}{2{,}74} = 0{,}79 U_{н.\ и},$$

т. е. составляет 79% $U_{н.\ и}$ двигателя. Так как напряжение $0{,}79U_{н.\ и} > 0{,}7U_{н.\ и}$, то отсюда следует, что запуск всех электродвигателей, подключенных к сборке, вполне обеспечивается.

Далее определяем уставки устройства АВР. Напряжение срабатывания реле минимального напряжения 1РН находим по формуле (8.16)

$$U_{ср\ 1РН} \leqslant \frac{U_{к.\ з}}{k_н} = \frac{0{,}7U_{н.\ и}}{1{,}25} = 0{,}56U_{н.\ и}$$

и из условия (8.14)

$$U_{ср\ 1РН} \leqslant \frac{U_в}{k_н} = \frac{0{,}79U_{н.\ и}}{k_н} = = 0{,}63U_{н.\ и}.$$

Так как каждое из полученных значений выше 25% $U_{н.\ и}$ рабочего источника питания, то в качестве расчетного значения напряжения срабатывания реле 1РН принимаем $U_{ср\ 1РН} = 0{,}25U_{н.\ и}$.

Напряжение срабатывания реле максимального напряжения 2РН

$$U_{ср\ 2РН} = \frac{k_в}{k_н} U_{раб.\ мин} = \frac{0{,}8}{1{,}1} \cdot 0{,}9U_{н.\ и} = 0{,}655U_{н.\ и}.$$

Так как полученное значение составляет более 60% $U_{н.\ и}$ резервного источника питания, то его и принимаем в качестве расчетного значения.

Выдержка времени реле времени РВ из условия (8.17)

$$t_{РВ} \geqslant t_{р.\ з} + \Delta t = 0{,}15 + 0{,}5 = 0{,}65 \text{ с}$$

и из условия (8.18)

$$t_{РВ} \geqslant t_{о.\ д} + \Delta t = 0{,}12 + 0{,}5 = 0{,}62 \text{ с}.$$

Принимаем $t_{РВ} = 0{,}7$ с.

Замедление на отпадание якоря реле РОВ устанавливаем по условию (8.6) при $\Delta t = 0,3$ с:

$$t_{\text{РОВ}} \geqslant t_{\text{в. в}} + \Delta t = 0,25 + 0,3 = 0,55 \text{ с.}$$

Ток срабатывания токовой защиты цепи резервного питания

$$I_{\text{с. з}} = \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} I_{\text{пуск}} = \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} (n_1 I_{\text{пуск 1}} + n_2 I_{\text{пуск 2}}) = \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} (n_1 I_{\text{н. д1}} k_{\text{пуск. д1}} +$$

$$+ n_2 I_{\text{н. д2}} k_{\text{пуск. д2}}) = \frac{1,4}{0,85} (3 \cdot 92 \cdot 5,3 + 3 \cdot 40 \cdot 4,5) = 3300 \text{ А.}$$

Зная коэффициент трансформации трансформаторов тока и коэффициент схемы, можно по формуле (8.25) определить ток срабатывания токового реле защиты.

Глава девятая

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЛИНИЙ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

На линиях с односторонним питанием большое распространение получили следующие разновидности устройств автоматического повторного включения (АПВ):

1) устройство АПВ с автоматическим возвратом, с пуском от релейной защиты — схема Мосэнерго;

2) устройство АПВ с автоматическим возвратом, с пуском от несоответствия положений ключа управления и выключателя — схема РПВ-58 Чебоксарского электроаппаратного завода.

Устройство АПВ по схеме Мосэнерго (рис. 9-1) действует следующим образом. При возникновении на линии короткого замыкания приходит в действие релейная защита, условно показанная одним реле РЗ. При этом подается питание на обмотку реле 1РВ и на отключающую катушку КО линейного выключателя. Реле 1РВ срабатывает и контактом $1РВ_1$ самоудерживается, а контактом $1РВ_2$ замыкает цепь питания реле 1РП, запуская этим устройство АПВ. Реле 1РП срабатывает и контактом $1РП_1$ замыкает цепь питания реле времени 2РВ, которое мгновенным контактом $2РВ_1$ берет себя на самопитание. Часовой механизм реле 2РВ приходит в действие, что приводит к замыканию сначала импульсного контакта $2РВ_3$, а затем и конечного контакта $2РВ_2$. К моменту замыкания импульсного контакта $2РВ_3$ выключатель В уже будет отключен, реле РЗ и 1РВ возвратятся в исходное положение. Также возвратится в исходное положение реле 1РП, которое разомкнет свои контакты $1РП_1$ и $1РП_2$ и замкнет контакт $1ПР_3$, подготавливая этим цепь на включение выключателя от устройства АПВ.

По истечении соответствующим образом рассчитанной выдержки времени $t_{\text{АПВ}}$ замыкается импульсный контакт $2РВ_3$ реле времени 2РВ

в цепи питания параллельной обмотки реле 2РП. Последнее срабатывает, замыкает цепь включения выключателя и самоудерживается своей последовательной обмоткой до окончания процесса включения выключателя, т. е. до момента размыкания блок-контакта *1* на валу выключателя.

Если в момент бестоковой паузы короткое замыкание на линии самоустранилось, то при включении выключателя от устройства АПВ он останется во включенном положении и на линии восстановится нормальный режим работы. Если же короткое замыкание окажется устойчивым, то выключатель вторично будет отключен релейной защитой.

В первом случае, т. е. при оставшемся включенном положении выключателя, его блок-контакт *1* разомкнется, якорь реле 2РП отпа-

Рис. 9-1. Схема АПВ Мосэнерго с пуском от релейной защиты.

дет и оно разомкнет свой контакт. Импульсный контакт $2РВ_3$ реле 2РВ к этому времени будет разомкнут. По истечении некоторого времени, которое можно назвать временем деблокировки $t_{дебл}$, замкнется конечный контакт $2РВ_2$ реле 2РВ и деблокирует устройство, т. е. АПВ возвратится в исходное положение, при котором оно будет готово к последующему действию.

Во втором случае, т. е. при вновь отключившемся выключателе, повторное его включение от АПВ не произойдет, так как цепь параллельной обмотки реле 2РП не может закрыться на разомкнувшемся к тому времени импульсном контакте $2РВ_3$ реле 2РВ. Этим обеспечивается однократность действия АПВ.

Время замыкания конечного контакта $2РВ_2$ реле 2РВ (рис. 9-1) определяется расчетом.

При отключении выключателя от руки устройство АПВ не срабатывает, так как оно при этом не запускается.

АПВ по схеме Чебоксарского электроаппаратного завода действует следующим образом (рис. 9-2).

При возникновении на линии короткого замыкания приходит в действие релейная защита, которая срабатывает и замыкает цепь питания последовательной обмотки реле 3РП и обмотки катушки отключения КО. Выключатель В отключается, при этом возникает несоответствие между положениями выключателя и ключа управления и цепь *4—5* остается замкнутой. Так как блок-контакт *1* при этом замкнут, то в цепи обмотки реле 1РП появляется ток, ограниченный сопротивлением R_1 до значения, при котором реле 1РП может сработать, а катушка включения КВ работать не может. Реле 1РП срабатывает и подает питание на реле времени РВ, которое контактом $РВ_1$ дешунтирует токоограни-

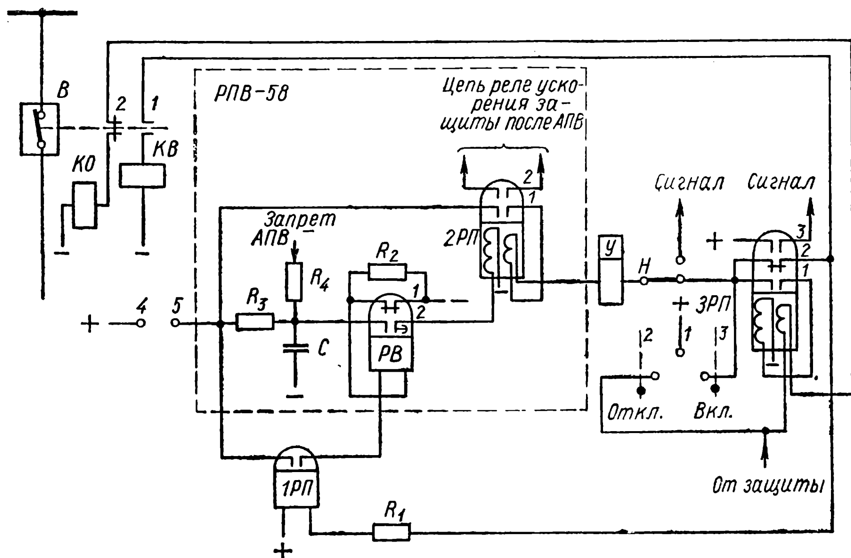


Рис. 9-2. Схема АПВ типа РПВ-58 с пуском от несоответствия положений ключа управления и выключателя.

чивающее сопротивление R_2 в цепи своей обмотки, а контактом $РВ_2$ с определенной выдержкой времени $t_{АПВ}$ замыкает цепь разряда конденсатора *C* на параллельную обмотку реле 2РП. Последнее срабатывает и замыкает цепь питания своей последовательной обмотки и обмотки катушки включения КВ линейного выключателя. Выключатель включается.

Однократность действия устройства АПВ в схеме создается конденсатором *C*, который, разрядившись на параллельную обмотку реле 2РП, вновь может зарядиться лишь после включения выключателя, когда реле 1РП будет длительно обесточено, а следовательно, будет обесточено реле РВ. Время заряда конденсатора определяется расчетом и может регулироваться изменением зарядного сопротивления R_3.

При отключении выключателя от руки устройство АПВ не срабатывает, так как при этом размыкается цепь *4—5* ключа управления

и обмотка реле времени РВ отсоединяется от положительного полюса батареи. При этом конденсатор C разряжается через сбмотку реле времени РВ, не вызывая, однако, срабатывания последнего из-за сильного ограничения тока разряда сопротивлением R_3.

Некоторое преимущество схемы АПВ Чебоксарского электроаппаратного завода по сравнению со схемой Мосэнерго заключается в том, что здесь выключатель включается обратно при отключении его по любым причинам, исключая случаи оперативного его отключения персоналом с помощью ключа управления. В схеме же АПВ Мосэнерго обратное включение выключателя возможно только в тех случаях, когда приходит в действие релейная защита.

К недостаткам схемы Мосэнерго относится также то, что в ней вероятны случаи неправильной работы вследствие застревания импульсного контакта $РВ_3$ реле времени РВ. Чтобы избежать этого, применяется специальная блокировка в виде перемычки между контактом $1РП_2$ реле 1РП и обмоткой последнего (рис. 9-1).

К недостаткам схемы АПВ Чебоксарского электроаппаратного завода относится то, что здесь возможна неправильная работа всего устройства из-за пробоя конденсатора C.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ

Схема Мосэнерго

В схеме Мосэнерго (рис. 9-1) должны быть определены следующие величины:

1) $t_{АПВ}$, т. е. выдержка времени замыкания импульсного контакта $2РВ_3$ реле времени 2РВ, определяющая момент замыкания цепи на включение выключателя от устройства АПВ;

2) $t_{дебл}$, т. е выдержка времени замыкания конечного контакта $2РВ_2$ реле времени 2РВ, определяющая момент возврата устройства в исходное положение.

Выдержка времени $t_{АПВ}$ в схеме определяется временем отключения выключателя $t_{о.\,в}$, а также временем возврата в исходное положение реле защиты $t_{в.\,з}$, временем готовности к повторному действию механизма привода выключателя $t_{г.\,п}$ и временем деионизации среды $t_{д.\,с}$ после погасания электрической дуги в месте короткого замыкания.

В расчет для каждого конкретного случая должно вводиться наибольшее из времен $t_{в.\,з}$, $t_{г.\,п}$ и $t_{д.\,с}$. Время $t_{в.\,з}$ обычно значительно меньше $t_{г.\,п}$ и $t_{д.\,с}$. Обычно $t_{г.\,п}$ и $t_{д.\,с}$ соизмеримы и поэтому следует вводить в расчет большее из них. Тогда при $t_{г.\,п} > t_{д.\,с}$ выдержку времени $t_{АПВ}$ определяем по формуле

$$t_{АПВ} = t_{о.\,в} + t_{г.\,п} + t_{зап}, \qquad (9.1)$$

а при $t_{д.\,с} > t_{г.\,п}$

$$t_{АПВ} = t_{о.\,в} + t_{д.\,с} + t_{зап}, \qquad (9.2)$$

где $t_{зап}$ — время запаса, учитывающее погрешность в определении собственного времени аппаратуры и времени деионизации среды ($t_{зап} = 0,1 \div 0,15$ с).

Время отключения $t_{о.\,в}$ для различных типов выключателей приведено в табл. 2 [9-1, 9-2, 9-3].

Таблица 2

Тип выключателя	Тип привода	Время $t_{в.\,в}$ (с) включения выключателя от момента подачи импульса до момента		Время $t_{о.\,в}$ (с) отключения выключателя от момента подачи импульса до момента	
		замыкания контактов	остановки траверсы	размыкания контактов	остановки траверсы
МКП-35	ПЭ-2	0,4—0,45	0,45	0,05	0,2
МКП-160	ПС-30	0,8	0,85	0,07	0,35
МКП-110	ПЭ-3	—	0,5	0,04—0,06	—
МКП-274	ПС-30	1,5	1,55	0,08	0,35
МКП-220	ПЭ-42	—	0,7—0,8	0,04—0,05	—
ВВН-35	Пневматический	—	0,2	0,07	
ВВН-110	То же	—	0,3	0,05	0,07
ВВН-154	» »	—	0,3	0,06	0,08
ВВН-200	» »	—	0,25	0,06	0,08
ВН-330	» »	—	0,25	0,06	0,08
ВН-500	» »	—	0,28	0,06	0,08

Время деионизации среды $t_{д.\,с}$ после погасания электрической дуги в месте короткого замыкания, полученное в основном экспериментальным путем при различных напряжениях линии $U_л$ [9-4]:

$U_л$, кВ	$t_{д.\,с}$, с
35	0,07
110	0,15
220	0,30
400—500	0,35—0,4

Практически считают, что выдержка времени $t_{АПВ}$ должна быть порядка 0,3—0,5 с для линий напряжением 3—35 кВ и 0,5—0,6 с для линий 110—220 кВ.

Время деблокировки $t_{дебл}$ устройства, т. е. время замыкания конечного контакта $2РВ_2$ реле времени 2РВ должно быть выбрано так, чтобы оно было больше времени включения выключателя от устройства АПВ ($t_{АПВ} + t_{в.\,в}$) и времени последующего отключения выключателя от релейной защиты при включении на неустранившееся короткое замыкание ($t_{р.\,з} + t_{о.\,в}$). Следовательно,

$$t_{дебл} \geqslant t_{АПВ} + t_{в.\,в} + t_{р.\,з} + t_{о.\,в} + t_{зап}, \qquad (9.3)$$

где $t_{р.\,з}$ — время действия наиболее медленной релейной защиты, отключающей выключатель при включении его от устройства АПВ на

неустранившееся короткое замыкание на линии; $t_{зап}$ — время запаса, равное 0,7 — 1,0 с.

Если полученная по формуле (9.3) выдержка времени $t_{дебл}$ окажется меньше 8—10 с, то ее следует увеличить до этого значения. Этим учитывается снижение отключающей мощности масляных выключателей после каждого последующего действия устройства АПВ вследствие снижения изоляционных свойств масла. Следовательно, применительно к масляным выключателям должно выполняться не только условие (9.3), но и условие

$$t_{дебл} \geqslant t_{дебл.\ мин} = 8 \div 10 \text{ с}. \qquad (9.4)$$

Схема Чебоксарского электроаппаратного завода

В схеме Чебоксарского электроаппаратного завода (рис. 9-2) расчет сводится к определению следующих величин:

1) $t_{АПВ}$, т. е. выдержки времени замыкания контакта $РВ_2$ реле времени РВ, определяющей момент замыкания цепи на включение выключателя от АПВ;

2) $t_{дебл}$, т. е. времени заряда конденсатора C до напряжения срабатывания $U_{ср}$ реле 2РП;

3) зарядного сопротивления $R_з$.

Выдержка времени $t_{АПВ}$ в схеме Чебоксарского электроаппаратного завода должна определяться с учетом того, что в выражение для $t_{АПВ}$ не должно входить время отключения выключателя $t_{о.\ в}$, так как здесь реле времени РВ, создающее выдержку $t_{АПВ}$, получает питание лишь после отключения выключателя. Поэтому для этой схемы выражения (9.1) и (9.2) можно записать так:

$$t_{АПВ} = t_{г.\ п} + t_{зап}; \qquad (9.5)$$

$$t_{АПВ} = t_{д.\ с} + t_{зап}. \qquad (9.6)$$

Выдержка времени $t_{дебл}$ в схеме Чебоксарского электроаппаратного завода должна определяться с учетом того, что в выражение для $t_{дебл}$ не должно входить время $t_{АПВ}$ и $t_{в.\ в}$, так как конденсатор может заряжаться только при включенном выключателе. Поэтому выражение (9.3) принимает вид

$$t_{дебл} \geqslant t_{р.\ з} + t_{о.\ в} + t_{зап}. \qquad (9.7)$$

Напряжение батареи известно и обычно равно $U_б = 110$ В, емкость конденсатора C выбирается заводом, поставляющим устройства АПВ. Зная время заряда конденсатора $t_{зар} = t_{дебл}$, можно определить величину зарядного сопротивления $R_з$, исходя из следующих соображений. Как известно, при заряде конденсатора на его обкладках со временем t напряжение нарастает по закону

$$U_с = U_б\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right).$$

До значения срабатывания реле 2РП напряжение нарастает за время $t_{зар}$.
Тогда

$$U_{ср} = U_б\left(1 - e^{-\frac{t_{зар}}{RC}}\right).$$

После преобразования этого выражения получим

$$U_{ср} - U_б = -U_б e^{-\frac{t_{зар}}{RC}}$$

и

$$\frac{U_{ср} - U_б}{U_б} = -e^{-\frac{t_{зар}}{RC}} = -\frac{1}{e^{\frac{t_{зар}}{RC}}},$$

или

$$e^{\frac{t_{зар}}{RC}} = \frac{U_б}{U_б - U_{ср}}.$$

Прологарифмировав, получим

$$\frac{t_{зар}}{RC} = \ln\frac{U_б}{U_б - U_{ср}},$$

откуда искомое зарядное сопротивление, обозначенное в схеме через $R_з$,

$$R = \frac{t_{зар}}{C\ln\frac{U_б}{U_б - U_{ср}}}. \qquad (9.8)$$

Пример. *Дано*: 1. На радиальной линии напряжением 110 кВ с односторонним питанием, оборудованной устройством АПВ Чебоксарского электроаппаратного завода (рис. 9-2), установлен выключатель типа МКП-160 с приводом ПС-30.

2. Емкость конденсатора $C = 20$ мкФ, напряжение батареи $U_б = 110$ В, напряжение срабатывания реле 2РП $U_{ср} = 65$ В.

3. Наибольшая выдержка времени релейной защиты, действующей на отключение выключателя после его включения на короткое замыкание от устройства АПВ, $t_{р.з} = 5$ с.

Требуется: 1. Рассчитать выдержку времени $t_{АПВ}$, определяющую момент замыкания цепи на включение выключателя от АПВ, т. е. время замыкания контакта $РВ_2$ реле времени РВ (рис. 9-2).

2. Рассчитать время деблокировки $t_{дебл}$, определяющее момент возврата устройства АПВ в исходное положение, т. е. положение готовности к последующему действию. Применительно к схеме рис. 9-2 это будет также время $t_{зар}$ заряда конденсатора C.

3. Определить зарядное сопротивление в схеме заряда конденсатора из условия обеспечения необходимого времени заряда $t_{зар}$.

Решение. По данным [9-4] время деионизации среды на линии напряжением 110 кВ $t_{д.с} = 0{,}15$ с. Принимаем, что время готовности привода ПС-30 $t_{г.п}$ не превышает этого значения. Тогда по формуле (9.6) с учетом данных табл. 2 получим

$$t_{АПВ} = t_{д.с} + t_{зап} = 0{,}15 + 0{,}15 = 0{,}3 \text{ с}.$$

Выдержка времени $t_{дебл}$ или необходимое время заряда конденсатора $t_{зар}$ определим по формуле (9.7)

$$t_{дебл} = t_{р.\,з} + t_{о.\,в} + t_{зап} = 5{,}0 + 0{,}35 + 1{,}0 = 6{,}35 \text{ с},$$

и так как $6{,}35 < (8 \div 10)$ с, то по формуле (9.4) принимаем $t_{дебл} = 10$ с.

Зарядное сопротивление определим по формуле (9.8)

$$R = \frac{t_{зар}}{C \ln \frac{U_б}{U_б - U_{ср}}} = \frac{10}{20 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \frac{110}{110 - 65}} = 560\,000 \text{ Ом}.$$

Аналогично ведется расчет и применительно к схеме Мосэнерго.

Глава десятая

РАСЧЕТ АПВ ЛИНИЙ С САМОСИНХРОНИЗАЦИЕЙ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

АПВ линий с самосинхронизацией гидрогенераторов, предложенное И. А. Сыромятниковым, представляет собой трехфазное автоматическое повторное включение линий передачи и генераторов с применением способа самосинхронизации (АПВС), который применяется в том случае, когда электростанция связана с энергосистемой одиночной линией электропередачи. При этом АПВС, устанавливаемое на линии со стороны гидростанции, запускается только в случае успешного действия устанавливаемого со стороны системы обычного трехфазного АПВ с контролем отсутствия напряжения.

Сущность этого можно уяснить, рассмотрев упрощенную схему гидростанции, выдающей свою мощность в систему по одноцепной линии (рис. 10-1).

На линии установлена релейная защита, условно обозначенная через 1РЗ и 2РЗ. При возникновении короткого замыкания на линии срабатывает релейная защита 1РЗ и отключает линейный выключатель ВЛ со стороны энергосистемы. Релейная защита 2РЗ также срабатывает, но не отключает ВЛ со стороны гидростанции, а подает питание на обмотку промежуточного реле РП, с помощью которого действие защиты 2РЗ переносится с линейного на генераторные выключатели ВГ. При этом реле РП дополнительно производит следующие действия:

1) при замыкании контакта *1* и отключении соответствующего генератора на вспомогательных контактах его выключателя ВГ замыкается цепь обмотки катушки отключения КО устройства АГП;

2) при замыкании контакта *2* замыкается цепь к устройству ограничителя открытия направляющего аппарата, который при этом начинает действовать в сторону *Убавить* обороты. Контакт $ВКО_1$ замкнут при любом открытии направляющего аппарата, соответствующем впуску воды больше, чем это необходимо при холостом ходе турбины;

3) при замыкании контакта *3* замыкается цепь самоудерживания реле РП, по которой подается плюс через параллельно включенные контакты реле $РН_ш$, $РН_г$ и РС. Последние контролируют действие реле РП на обратное включение выключателей генераторов при наличии условий самосинхронизации.

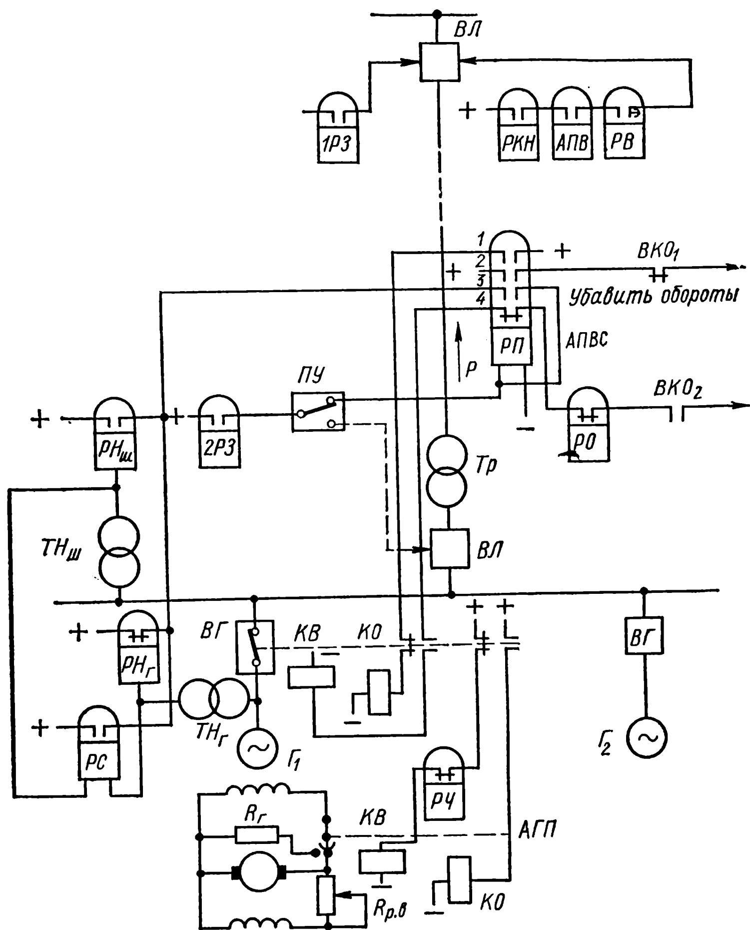


Рис. 10-1. Схема гидростанции, выдающей мощность в систему по одноцепной линии электропередачи, с применением АПВ с самосинхронизацией гидрогенераторов.

В условиях нормальной работы линии контакты реле напряжения $РН_ш$ на шинах ГЭС и реле скольжения РС разомкнуты, а реле напряжения $РН_г$ на выводах каждого из генераторов — замкнуты.

В момент отключения ВЛ со стороны системы и генераторных выключателей ВГ реле $РН_ш$ обесточивается и замыкает свои контакты. При этом замыкает контакты и реле скольжения РС. Так как по времени

это соответствует начальному моменту подачи импульса на гашение поля генератора, то при этом и реле $РН_г$ еще держит свои контакты замкнутыми. Таким образом, в начальный момент после отключения линии контакты реле $РН_ш$, $РН_г$ и РС оказываются замкнутыми и через них самоудерживается реле РП устройства АПВС.

После отключения линии с обеих сторон устройство АПВ с проверкой отсутствия напряжения включает линию со стороны энергосистемы в работу повторно. При этом, если на линии было устойчивое короткое замыкание, то защита 1РЗ снова отключит линию и АПВС не состоится. Если линия исправна, то она со стороны энергосистемы останется включенной и на шинах ГЭС появится напряжение.

С появлением на шинах ГЭС нормального напряжения реле $РН_ш$ срабатывает и своими контактами размыкает цепь самоудерживания реле РП. Последнее продолжает самоудерживаться через контакты реле $РН_г$ и РС.

В результате действия устройства гашения поля напряжение генератора снижения и при значении, ниже 10 % номинального, срабатывает реле $РН_г$ и своими контактами размыкает цепь самоудерживания реле РП.

В результате действия ограничителя открытия направляющего аппарата в сторону *Убавить* обороты скорость вращения генератора снижается. При скорости вращения генератора, соответствующей скольжению $S \leqslant 10\%$, срабатывает также реле РС и своими контактами размыкает последнюю цепь самоудерживания реле РП. При этом реле РП, потеряв питание, замыкает контакт *4* в цепи катушки включения КВ генераторного выключателя ВГ. Если к этому времени впуск воды в турбину окажется не больше, чем необходимо при холостом ходе турбины, то контакты $ВКО_2$ будут замкнуты, и генератор включится, так как контакты реле оборотов РО, срабатывающего при скорости вращения генератора больше 90% номинальной, будут также замкнуты.

Ротор включенного генератора под влиянием среднего асинхронного момента продолжает снижать скорость вращения до синхронной. При снижении скорости вращения до такой, при которой скольжение достигает значения $s = -(1 \div 2)\%$*, срабатывает реле разности частот РЧ, замыкает свои контакты и включает АГП. Дальше под влиянием синхронного момента генератор втягивается в синхронизм.

Одновременно с включением АГП подается импульс на ограничитель открытия направляющего аппарата для приведения его в положение, соответствующее нормальной или другой заданной нагрузке (на схеме не показано).

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛА ОБОРОТОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРА

Характер изменения числа оборотов гидрогенератора после сброса нагрузки при наличии автоматического регулятора скорости АРС зависит от следующих параметров:

---

* Знак минус указывает, что данное скольжение соответствует скорости вращения, выше номинальной.

а) момента инерции гидроагрегата;
б) величины предшествующей нагрузки генератора;
в) скорости закрытия направляющего аппарата турбины;
г) настройки АРС;
д) механических потерь гидроагрегата.

В зависимости от настройки регулятора скорости изменение числа оборотов агрегата после сброса нагрузки может носить колебательный или апериодический характер. В том и другом случае после окончания переходного процесса устанавливается число оборотов агрегата несколько выше номинального (рис. 10-2).

Установившееся превышение числа оборотов, зависящее в конечном счете от величины предшествующей сбросу нагрузки $P_{сб}$ генера-

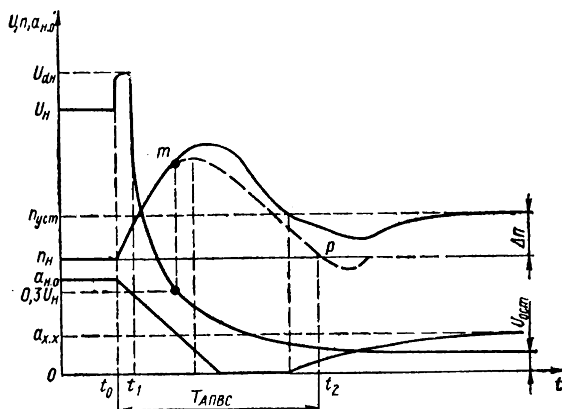


Рис. 10-2. График изменения скорости вращения и напряжения гидрогенератора при сбросе нагрузки и гашении поля.

тора и от остаточной неравномерности, или коэффициента статизма АРС турбины $k_с$, с достаточной для практики точностью может быть определено [10-2] из соотношения

$$\Delta n = k_с \frac{P_{сб}}{P_н}, \tag{10.1}$$

где $P_н$ — номинальная активная мощность нагрузки агрегата.

Как видно из кривой (рис. 10-2), при сбросе нагрузки скорость вращения гидрогенератора быстро возрастает до максимальной, достигая при этом 1,3 $n_н$, и затем начинает снижаться до некоторого установившегося значения $n_{уст}$. При этом, в случае полного сброса нагрузки, например при выдаче всей мощности станции в систему, скорость вращения генераторов снижается до установившегося значения $n_{уст}$ только через 10—40 с. Поэтому автоматическое включение необходимо производить значительно раньше, чем гидрогенераторы достигнут установившейся скорости вращения $n_{уст}$. При этом цикл АПВС будет значительно сокращен.

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СТАТОРА

Характер изменения напряжения статора генератора после сброса нагрузки зависит в общем случае от следующих параметров:

а) нагрузки генератора, предшествующей сбросу;

б) схемы и параметров АГП;

в) постоянных времени обмотки ротора и успокоительных обмоток полюсов;

г) наличия регулятора напряжения;

д) повышения оборотов.

В начальный момент сброса нагрузки, т. е. в момент времени t_0 (рис. 10-2), напряжение обмотки статора генератора мгновенно повышается вследствие исчезновения реакции якоря и потока рассеяния обмотки статора. Это повышение может быть найдено построением диаграммы, считая, что генератор в предаварийный период работал с номинальной нагрузкой и что после сброса нагрузки ток возбуждения и скорость вращения не изменяются. Расчет с помощью этой диаграммы сводится к определению тока возбуждения с учетом рассеяния и реакции якоря и к нахождению э. д. с. U_0, соответствующей этому току возбуждения. Искомое повышение напряжения определяется как разность между э. д. с. U_0 и номинальным напряжением генератора $U_н$.

С достаточной для практики точностью искомое повышение напряжения при полном сбросе нагрузки генератора может быть найдено более простым путем. Для этого должна быть построена так называемая нормальная характеристика холостого хода гидрогенератора в относительных единицах по таким данным:

Ток возбуждения $I_в$ в относительных единицах	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Относительная э. д. с. U_0 гидрогенератора	0,53	1,0	1,23	1,3	1,34	1,36

Ток возбуждения в относительных единицах в момент времени, предшествующий сбросу нагрузки, можно определить по известной формуле завода «Электросила»

$$I_в = \sqrt{(\cos\varphi)^2 + (I_н x_d + \sin\varphi)^2}, \qquad (10.2)$$

где $I_н$ и x_d — номинальный ток нагрузки и синхронная реактивность данного гидрогенератора в относительных единицах.

Зная ток возбуждения, по характеристике холостого хода определяют соответствующее ему значение э. д. с. U_0. Тогда искомое повышение напряжения определится из соотношения

$$\Delta U_{н.\,ф}\% = \frac{U_0 - U_{н.\,ф}}{U_{н.\,ф}} \cdot 100, \qquad (10.3)$$

где $U_{н.\,ф}$ — номинальное фазное напряжение генератора.

На протяжении времени $t_1 - t_0$ (рис. 10-2) напряжение генератора возрастает за счет увеличения скорости вращения агрегата, а также за счет затухания апериодических токов в успокоительных контурах ротора и к моменту времени t_1, т. е. к началу работы устройства гаше-

ния поля (АГП), достигает значения $U_{d\text{н}}$. Так как отрезок времени $t_1 - t_0$ с момента отключения АГП очень мал, то в упрощенных расчетах соответствующим приращением напряжения можно пренебречь. В этом случае междуфазное напряжение генератора в начале процесса гашения поля с учетом соотношения (10.3)

$$U_{d\text{н}} = U_{\text{н}} + \Delta U_{\text{н. ф}} \sqrt{3}. \quad (10.4)$$

В момент времени t_1 отключается автомат гашения поля, после чего напряжение статора генератора понижается до остаточного напряжения примерно по закону показательной функции (по экспоненте)

$$U_d = (U_{d\text{н}} - U_{d\,\text{ост}})\, e^{-\frac{t}{T_\text{г}}} + U_{d\,\text{ост}}, \quad (10.5)$$

где $U_{d\text{н}}$ — напряжение генератора в начале процесса гашения поля;
U_d — напряжение в момент времени t;
$U_{d\,\text{ост}}$ — остаточное напряжение генератора в конце процесса гашения поля;
$T_\text{г}$ — постоянная времени гашения поля, с;
t — время с начала действия гашения поля, с.

Постоянная времени гашения поля $T_\text{г}$ может быть определена из соотношения

$$T_\text{г} = T_{1do} + T_{\text{в}do} \cdot \frac{r_\text{в}}{r_\text{в} + r_\text{г}}, \quad (10.6)$$

где $T_{\text{в}do}$ — постоянная времени обмотки ротора при разомкнутой обмотке статора, с;
T_{1do} — постоянная времени успокоительных контуров при разомкнутой обмотке статора, с;
$r_\text{в}$ — сопротивление обмотки ротора в горячем состоянии, Ом;
$r_\text{г}$ — разрядное сопротивление, Ом.

При гашении поля путем замыкания обмотки ротора накоротко, т. е. при $r_\text{г} = 0$, соотношение (10.6) принимает вид

$$T_\text{г} = T_{1\,do} + T_{\text{в}\,do} = T'_{do}, \quad (10.7)$$

где T'_{do} — постоянная времени обмоток при разомкнутой обмотке статора, с.

Если определение постоянной времени гашения поля $T_\text{г}$ по выражениям (10.6) и (10.7) затруднительно (так как иногда неизвестны постоянные времени T_{1do} и $T_{\text{в}do}$), то ее можно определить одним из следующих известных практических методов с помощью:

а) вольтметра и ручного секундомера;

б) шлейфового осциллографа;

в) мгновенного реле понижения напряжения и электрического секундомера;

г) катодного осциллоскопа и ручного секундомера.

Остаточное напряжение генератора $U_\text{ост}$, в случае применения наиболее распространенной схемы гашения поля ХТГЗ с введением сопротивления в цепь ротора генератора и отключением возбудителя, определяется только остаточным намагничиванием полюсов ротора и практически не превосходит величины $U_\text{ост} = 150$ В.

Разрядное сопротивление выбирается в пределах $r_\text{г} = (3 \div 5)\, r_\text{в}$.

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ЦИКЛА АПВС

Время полного цикла АПВС обычно определяют с момента сброса нагрузки до подачи возбуждения при скольжении $s = -(1 \div 2)\%$ и обозначают $T_{\text{АПВС}}$. Без применения специальных мер время цикла АПВС может достигать 20—30 с и выше. Из рассмотрения кривых изменения числа оборотов и напряжения генератора (рис. 10-2) видно, что время $T_{\text{АПВС}}$ определяется в основном временем установления скорости вращения, близкой к синхронной. Отсюда возникла идея торможения агрегата после сброса нагрузки. Известны следующие способы торможения:

1. Механическое с применением специальных мощных тормозных колодок.

2. Электромагнитное с помощью включения на шины электростанции в момент сброса нагрузки активного сопротивления, предотвращающего повышение скорости вращения при сбросе нагрузки.

3. Асинхронное, получаемое при включении невозбужденного генератора в сеть, когда напряжение генератора снижается только до значения $(0{,}2 \div 0{,}3)\ U_{\text{н}}$. Такое включение может произойти в тот момент, когда $s = -(20 \div 30)\%$. При этом включение может произойти на восходящей части кривой изменения скорости вращения в точке m (рис. 10-2). Начиная с точки m скорость вращения генератора под воздействием среднего асинхронного момента изменяется по штриховой кривой $m - p$, достигая в точке p значения, соответствующего скольжению $s = -(1 \div 2)\%$, при котором включается АГП и подается возбуждение генератору.

Одновременно с включением АГП должен подаваться импульс на отведение ограничителя открытия до положения, соответствующего номинальной (или другой заданной) нагрузке. По опытным данным ВНИИЭ [10-4] при наличии на роторе генератора успокоительной обмотки (даже неполной) время установления скорости вращения агрегата после сброса номинальной нагрузки сокращается за счет асинхронного торможения почти в два раза по сравнению со сбросом той же нагрузки при отсутствии торможения.

4. Гидравлическое, применяемое для всех типов гидротурбин. Этот способ торможения осуществляется путем задержки направляющего аппарата турбины в полностью закрытом состоянии до момента, когда скорость вращения достигает установившегося значения $n_{\text{уст}}$ (рис. 10-2). После этого направляющий аппарат под воздействием АРС начинает открываться до положения, соответствующего открытию холостого хода $a_{\text{х. х}}$ турбины. Такой способ торможения дает некоторый выигрыш времени установления необходимой скорости вращения турбоагрегата.

5. Гидравлическое, применяемое для турбин поворотно-лопастного типа. Этот способ торможения осуществляется путем использования естественного гидравлического торможения, возникающего в камере рабочего колеса после сброса нагрузки и закрытия направляющего аппарата при оставленных в развернутом состоянии лопастях

рабочего колеса*. Получающийся в этом случае естественный гидравлический тормозной момент достигает значения порядка номинального момента турбины. Считают, что время установления нормальной скорости вращения после сброса нагрузки при данном способе торможения может быть ориентировочно принято равным удвоенному значению времени закрытия направляющего аппарата или равным удвоенному времени с момента сброса нагрузки до момента установления максимальной скорости вращения гидроагрегата (рис. 10-2). Так как для мощных гидрогенераторов время закрытия направляющего аппарата составляет 4—6 с, то полное время цикла АПВС $T_{АПВС} = 8 \div 12$ с.

6. Асинхронное и гидравлическое, применяемые совместно. В этом случае можно будет получить дальнейшее сокращение цикла АПВС.

Из всех рассмотренных способов торможения гидроагрегатов на практике применяются главным образом асинхронное и гидравлическое торможения.

Считают, что при дальнейшем снижении времени цикла АПВС необходима не только разработка более эффективных способов торможения**, но и применение более быстродействующих схем гашения поля. В частности, намечается применение схем АГП с зависимым от напряжения сопротивлением типа «вилит».

Из рассмотрения графика (рис. 10-2) легко убедиться, что время цикла АПВС значительно зависит от времени закрытия направляющего аппарата турбины. Однако из-за гидравлического удара получить заметное уменьшение цикла АПВС путем повышения скорости закрытия невозможно.

О СХЕМАХ И РАСЧЕТАХ АПВС

Типовых схем АПВС еще нет. Применяются различные схемы АПВС [10-5], зависящие от типа электростанций, режима и условий их работы. Отсутствие достаточного опыта применения АПВС не могло не сказаться и на разработке расчетов, необходимых как для проектирования и эксплуатации этих устройств, так и для использования их в учебном процессе.

Рассмотрим на конкретном примере некоторые ориентировочные расчетные соотношения, которые способствуют более полному изучению процесса АПВС.

В начале расчета проверим включение генераторов по схеме самосинхронизации из условия допустимого значения уравнительного тока в момент включения по формуле

$$I_{ур} = \frac{U_0}{x'_d + x_c} \leqslant 3{,}5 I_н, \tag{10.8}$$

* При нарушенной комбинаторной зависимости.

** Например, асинхронное при специально выполненной успокоительной обмотке на роторе гидрогенератора и др.

где $I_{ур}$ — действующее значение периодической составляющей переходного тока при включении генератора в сеть;

$U_с$ — напряжение сети, приведенное к напряжению генератора;

x'_d — индуктивное переходное сопротивление генератора;

$x_с$ — индуктивное сопротивление сети, приведенное к мощности включаемого генератора.

Применяя в формуле (10.8) величины в относительных единицах, получим кратность уравнительного тока по отношению к номинальному току статора.

Пример. *Дано*: 1. Два вертикальных гидрогенератора без успокоительной обмотки на роторе мощностью $S_н = 4000$ кВА; $U_н = 6{,}6$ кВ; $\cos\varphi = 0{,}8$; $x'_d = 28{,}7\%$; $x_d = 91\%$; $r_в = 0{,}12\%$; $T_{вd0} = 2{,}58$ с работают на шины генераторного напряжения и через повышающий трансформатор выдают всю мощность в систему (рис. 10-1).

2. Сопротивление повышающего трансформатора и системы, приведенное к мощности одного генератора, $x_с = 20\%$.

3. До момента сброса нагрузки каждый из генераторов работал при полной номинальной мощности нагрузки.

4. Гидрогенераторы вертикальные, винтовые, поворотно-лопастные (типа Каплан).

5. Время закрытия направляющего аппарата турбины $t_{з.\,н.\,а} = 4$ с.

6. Коэффициенты статизма регуляторов скорости гидрогенераторов одинаковы: $k_с = 0{,}05$.

7. АГП генераторов выполнены по схеме ХТГЗ, в соответствии с чем сопротивление гашения может быть принято равным $r_г = 5r_в$.

8. Остаточное напряжение при гашении поля $U_{ост} = 0{,}02U_н$.

Требуется: 1. Проверить возможность включения генератора по способу самосинхронизации из условия допустимого значения уравнительного тока в момент включения.

2. Определить напряжение генератора $U_{dн}$ в начале процесса гашения поля после сброса нагрузки.

3. Построить кривую изменения напряжения генератора в процессе гашения поля.

4. Определить установившееся превышение скорости вращения агрегата после сброса нагрузки и соответствующее скольжение s.

5. Выбрать способ торможения турбоагрегата для уменьшения цикла АПВС. Оценить ориентировочно время цикла АПВС при принятом способе торможения.

6. Определить время размыкания контактов реле напряжения $РН_г$ с начала гашения поля генератора.

Решение. 1. Уравнительный ток в момент включения первого генератора определяем по формуле (10.8)

$$I_{ур} = \frac{U_с}{x'_d + x_с} = \frac{1}{0{,}287 + 0{,}2} = \frac{1}{0{,}487} = 2{,}06 < 3{,}5,$$

т. е. условие включения генератора по способу самосинхронизации удовлетворяется.

При включении вслед за первым второго генератора он будет работать уже не на систему, а на шины генераторного напряжения. В этом случае

$$I_{ур} = \frac{U_с}{x'_d + \frac{x'_d x_с}{x'_d + x_с}} = \frac{1}{0{,}287 + \frac{0{,}287 \cdot 0{,}2}{0{,}287 + 0{,}2}} = \frac{1}{0{,}405} = 2{,}5 < 3{,}5,$$

т. е. условие включения также удовлетворяется.

2. Определим напряжение $U_{dн}$ генератора в начальный момент гашения поля.

Ток возбуждения $I_в$ в относительных единицах в момент времени, предшествующий сбросу нагрузки, определяем по формуле (10.2)

$$I_в = \sqrt{(\cos\varphi)^2 + (I_н x_d + \sin\varphi)^2} = \sqrt{0{,}8^2 + (1 \cdot 0{,}91 + 0{,}6)^2} = \sqrt{2{,}92} = 1{,}71.$$

Построив по данным, приведенным выше, нормальную характеристику генератора (рис. 10-3) и отложив по оси абсцисс относительный ток возбуждения при нормальной нагрузке $I_в = 1{,}71$, находим отрезок $\overline{OA} = U_0 = 1{,}28$. Повышение напряжения в процентах в момент сброса нагрузки находим из выражения (10.3)

$$\Delta U_{н.\,ф}\% = \frac{U_0 - U_{н.\,ф}}{U_{н.\,ф}} \cdot 100 = \frac{1{,}28 - 1}{1} \cdot 100 = 28\%,$$

или в вольтах

$$\Delta U_{н.\,ф} = 0{,}28 \cdot 3800 = 1065 \text{ В}.$$

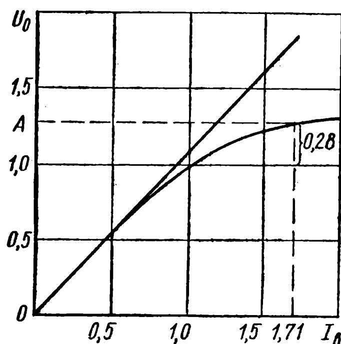


Рис. 10-3. Характеристика холостого хода гидрогенератора.

Из выражения (10.4) определяем междуфазное напряжение генератора в начальный момент гашения поля

$$U_{dн} = U_н + \sqrt{3} \cdot \Delta U_{н.\,ф} = 6600 + \sqrt{3} \cdot 1065 = 8450 \text{ В}.$$

Остаточное напряжение генератора после гашения поля

$$U_{d\,ост} = 0{,}02 U_н = 0{,}02 \cdot 6600 = 132 \text{ В}.$$

Принимаем $U_{d\,ост} = 130$ В.

Определим изменение напряжения генератора в процессе гашения поля.

Сопротивление гашения поля

$$r_г = 5 r_в = 5 \cdot 0{,}12 = 0{,}6\%,$$

тогда постоянную времени гашения поля определяем из формулы (10.6) при $T_{1do} = 0$:

$$T_г = T_{вdo} \frac{r_в}{r_в + r_г} = 2{,}58 \frac{0{,}12}{0{,}12 + 0{,}6} = 0{,}43 \text{ с}.$$

Небольшая постоянная времени гашения поля (для генераторов без успокоительной обмотки) значительно ускоряет процесс снижения напряжения.

Подставляя найденные значения соответствующих величин в выражение (10.5), получим закон изменения напряжения генератора при гашении поля в виде

$$U_d = (U_{dн} - U_{d\,ост})\, e^{-\frac{t}{T_г}} + U_{d\,ост} = (8450 - 130)\, e^{-\frac{t}{T_г}} + 130,$$

или

$$U_d = 8320 \cdot e^{-\frac{t}{T_г}} + 130. \qquad (10.9)$$

3. Подставляя в выражение (10.9) различные значения времени t в секундах, получаем соответствующие значения напряжения U_d. В частности, при $t = 0$ получаем $U_d = U_{dн} = 8450$ В; при $t = \infty$ напряжение $U_d = U_{d\,ост} = 130$ В. Построенная по этим данным кривая $U_d = f(t)$ приведена на рис. 10-4.

4. По формуле (10.1) определяем установившееся превышение скорости вращения агрегата после сброса нагрузки, предполагая, что до сброса генератор работал

с нагрузкой $P_{сб}$, равной номинальной $P_н$, и коэффициентом статизма $k_с = 0{,}05$:

$$\Delta n\% = k_с \frac{P_{сб}}{P_н} \cdot 100 = 0{,}05 \cdot 100 = 5\%.$$

При этом скольжение

$$s = \frac{n_н - n_{уст}}{n_н} \cdot 100 = \frac{1 - 1{,}05}{1} \cdot 100 = -5\%.$$

Знак минус указывает, что установившаяся скорость вращения агрегата после сброса нагрузки оказывается выше синхронной (номинальной).

Как уже было сказано, одним из условий АПВС является включение АГП в момент, когда скорость вращения агрегата снизится до значения, при котором скольжение $s = -(1 \div 2)\%$ (уставка реле разности частот РЧ). Но так как в данном случае скольжение получилось больше требуемого, то для его снижения необходимо соответствующим образом воздействовать на механизм изменения скорости турбины.

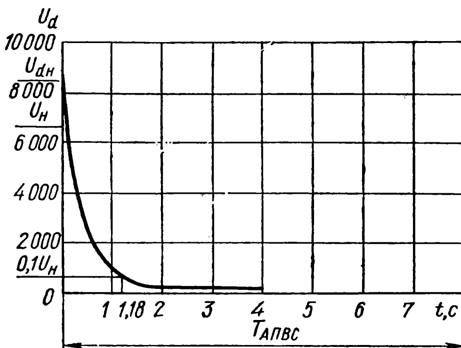


Рис. 10-4. Графическое определение момента размыкания контактов реле напряжения $РН_г$ (рис. 10-1) при снижении напряжения генератора до 10% $U_н$.

5. Для уменьшения цикла АПВС выбираем способ торможения агрегата после сброса нагрузки. Простым эффективным способом торможения агрегата является проверенный ВНИИЭ способ асинхронного торможения, при котором генератор включается в сеть при снижении напряжения только до $(0{,}2 \div 0{,}3)\ U_н$ и затем подводится к подсинхронной скорости за счет среднего асинхронного момента. Однако применить этот способ торможения не можем из-за отсутствия успокоительной обмотки на роторе и, следовательно, малого значения асинхронного момента.

Из других способов торможения для наших условий наиболее эффективным и проверенным на опыте является гидравлический способ торможения, применяемый для турбин поворотно-лопастного типа.

Время установления нормальной скорости вращения после сброса нагрузки при данном способе торможения ориентировочно может быть принято равным удвоенному значению времени закрытия направляющего аппарата. Следовательно, в данном случае полный цикл АПВС ориентировочно составит

$$T_{АПВС} = 2t_{з.\,н.\,а} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ с}.$$

6. Момент времени размыкания контактов реле напряжения $РН_г$, т. е. время снижения напряжения генератора до значения $0{,}1U_н$, определим из выражения (10.9) при $U_d = 0{,}1 \cdot 6600 = 660$ В.

При этом получим

$$660 = 8320 \cdot e^{-\frac{t}{T_г}} + 130,$$

откуда

$$e^{-\frac{t}{0{,}43}} = \frac{530}{8320} = 0{,}0637,$$

или, прологарифмировав, получим

$$-\frac{t}{0,43} = \ln 0,0637 = \ln 637 - \ln 10^4 = 6,4568 - 9,2103 = -2,7535,$$

откуда

$$t = 0,43 \cdot 2,7535 = 1,18 \text{ с.}$$

Полученное значение времени t можно проверить графически, воспользовавшись кривой $U_d = f(t)$, приведенной на рис. 10-4.

Глава одиннадцатая

РАСЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЧАСТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ БЕЗ ПРОВЕРКИ СИНХРОНИЗМА. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как известно, распространенное трехфазное АПВ с контролем отсутствия встречного напряжения на одном конце линии и контролем синхронизма на другом применяется в тех случаях, когда имеются другие связи, по которым сохраняется параллельная работа системы. Восстановление же нормальной работы системы при отключении одиночных линий связи до недавнего времени производилось применением автоматического повторного включения, выполняемого в основном в виде:

а) АПВ с улавливанием момента синхронизма (АПВУС);

б) АПВ с самосинхронизацией генераторов (АПВС);

в) быстродействующего автоматического повторного включения (БАПВ).

Все эти способы автоматического повторного включения имеют свою ограниченную область применения.

Из опыта эксплуатации известно, что АПВ с улавливанием синхронизма при передаче по линии связи большой мощности часто не срабатывает вследствие быстрого расхождения по фазе напряжений отделившихся частей энергосистемы. АПВ с самосинхронизацией с развозбуждением генераторов применимо только для линий электропередачи, связывающих отдельные электростанции с системой, а не части энергосистемы между собой. Поэтому по поручению Технического управления была исследована возможность восстановления параллельной работы энергосистемы с помощью АПВ без контроля синхронизма, т. е несинхронного АПВ (НАПВ).

Из эксплуатации энергосистем известны примеры ошибочных включений двух несинхронно работающих частей энергосистемы без проверки синхронизма, когда после нескольких циклов асинхронного хода, как правило, устанавливался синхронный режим. С другой стороны, известно, что в разделившихся частях энергосистемы в зависи-

мости от степени нарушения баланса мощностей изменяются напряжение и частота. Следовательно, при повторных включениях вследствие расхождения по фазе напряжений возникает переходный процесс, который сопровождается значительными уравнительными токами и большими электромагнитными моментами, опасными для генераторов, трансформаторов и т. п.

Проведенные исследования, а также опытная проверка в некоторых энергосистемах показали, что при достаточном реактивном сопротивлении линии связи между частями энергосистемы включение без проверки синхронизма является вполне допустимым и в большинстве случаев такое несинхронное включение приводит к быстрому восстановлению нормальной работы системы [11-1, 11-2, 11-3].

Было показано [11-4], что в энергосистемах, состоящих в основном из тепловых электростанций, при перерыве связи до 1,0—1,5 с и передаче по линии связи мощности порядка 40—50% мощности станций менее мощной части системы синхронизм восстанавливается сразу же после включения. В других случаях сначала имеет место асинхронный режим, иногда длительный.

Асинхронный режим со значительным увеличением скольжения возможен при установлении НАПВ на линиях, связывающих с энергосистемой гидростанции без большой местной нагрузки. Длительная асинхронная работа возбужденных гидрогенераторов при скольжениях примерно 10% и выше является нежелательной вследствие возможных сильных колебаний напряжения во всей энергосистеме или в части ее [11-1]. В таких случаях схема НАПВ должна выполняться так, чтобы при возникновении асинхронного режима возбуждение генераторов отключалось с последующим обратным включением его при снижении скольжения до 2—5%, т. е. процесс аналогичен ресинхронизации генераторов [11-5].

В соответствии с полученными результатами исследований, расчетов и испытаний, проведенных ВНИИЭ и энергосистемами, Техническое управление приняло решение применять НАПВ на всех линиях электропередачи, отключение которых может вызвать нарушение синхронной работы электростанций или частей энергосистемы. При этом установлены соответствующие условия допустимости НАПВ по условиям прочности генераторов. Считалось, что НАПВ допустимо, если отношение тока несинхронного включения $I_{нс}$, возникающего при включении с углом расхождения векторов э. д. с. 180°, к номинальному току $I_н$ каждого из генераторов станции

$$\left.\begin{aligned} &\text{для турбогенераторов } \frac{I_{нс}}{I_н} \leqslant 5; \\ &\text{и для гидрогенераторов } \frac{I_{нс}}{I_н} \leqslant 3. \end{aligned}\right\} \qquad (11.1)$$

В последнее время выяснилось, что условия допустимости (11.1), базировавшиеся на исследованиях и испытаниях генераторов прежних конструкций, не соответствуют новым типам турбо- и гидрогенераторов с повышенным использованием активных материалов. Кроме того,

не было выработано условий допустимости НАПВ для синхронных компенсаторов, трансформаторов, а также указаний об учете тока нагрузки при определении кратностей тока (11.1), что приводило к завышению этих кратностей и, следовательно, к необоснованному ограничению области применения НАПВ.

Союзглавэнерго при Госплане СССР предлагает [11-6] в дальнейшем пользоваться более общими и более точными условиями допустимости НАПВ.

УСЛОВИЯ ДОПУСТИМОСТИ НЕСИНХРОННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

НАПВ допустимо для всех типов генераторов и синхронных компенсаторов, если максимальное значение кратности тока при включении с углом расхождения векторов э. д. с. 180° для каждого генератора станции или компенсатора не превышает:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{для турбогенераторов и гидрогенераторов с успокоительными контурами} & \dfrac{I_{нс}}{I_н} \leqslant \dfrac{0,625}{x''_d}; \\ \text{для гидрогенераторов без успокоительных контуров} & \dfrac{I_{нс}}{I_н} \leqslant 3,0; \\ \text{для синхронных компенсаторов} & \dfrac{I_{нс}}{I_н} \leqslant \dfrac{0,84}{x''_d}. \end{array}\right\} \quad (11.2)$$

Приведенное в формулах (11.2) максимальное значение кратности тока при несинхронном включении турбогенераторов и гидрогенераторов с успокоительным контуром дано с запасом, исходя из возможности включения генераторов при частоте и э. д. с., значительно превышающих номинальные их значения. Если же заведомо известно, что несинхронное включение происходит при частотах и напряжениях, отличающихся от номинальных не более чем на $\pm 5\%$, то максимальное значение допустимой кратности тока включения можно увеличить на 13% для турбогенераторов и на 35% для гидрогенераторов с успокоительной обмоткой.

УСЛОВИЯ ДОПУСТИМОСТИ НЕСИНХРОННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

НАПВ допустимо для всех типов трансформаторов, если максимальное значение кратности тока при включении с углом расхождения векторов э. д. с. 180° не превышает допустимой кратности тока короткого замыкания для данного трансформатора при номинальном напряжении, т. е. когда соблюдается условие

$$\frac{I_{нс}}{I_н} \leqslant \frac{100}{e_к\%}, \quad (11.3)$$

где $\dfrac{100}{e_к\%}$ — допустимая для трансформаторов расчетная кратность тока

по отношению к номинальному при номинальном напряжении; $e_к\%$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, т. е. напряжение, при котором протекающий в короткозамкнутом трансформаторе ток равен номинальному.

Допустимость НАПВ для трансформатора по условию (11.3) может не проверяться, если трансформатор работает в схеме блока и его мощность равна мощности генератора или генераторов (если последних подключено к трансформатору несколько, по схеме укрупненного блока).

УЧЕТ НАГРУЗОК ПРИ РАСЧЕТЕ ДОПУСТИМОСТИ НАПВ

Нагрузка в начальный момент несинхронного включения вследствие накопленной у нее к этому времени электромагнитной энергии представляет собой как бы дополнительный источник генерирующей мощности. Поэтому при НАПВ на долю нагрузки приходится часть уравнительного тока, ответвляющегося в нагрузку, что снижает долю уравнительного тока, приходящегося на генераторы той части системы, к которой подключена рассматриваемая нагрузка. В результате кратность тока в генераторах снижается. Неучет нагрузки, таким образом, приводит к завышенным по сравнению с действительными значениями кратностям токов.

Практически расчет допустимости НАПВ обычно ведется без учета нагрузки. При этом расчете правильные результаты будут, если нагрузка в отделившейся части системы оказывается значительно меньше суммарной генерирующей мощности станций в данной части системы. Если при расчете допустимости НАПВ без учета нагрузки получаются кратности тока несинхронного включения, превышающие допустимые значения, определяемые по формулам (11.2) и (11.3), то следует выполнить повторный, уточненный расчет допустимости НАПВ с учетом нагрузки. При этом нагрузка учитывается введением в схему замещения ответвления с э. д. с. нагрузки $E_н = 0{,}9$ и обобщенным относительным реактивным сопротивлением нагрузки $x_н = 0{,}35$, отнесенным к номинальной мощности учитываемой нагрузки.

ПОРЯДОК РАСЧЕТА УСЛОВИЙ ДОПУСТИМОСТИ НАПВ

Для определения допустимости несинхронного включения выключателя на линии передачи, связывающей две части энергосистемы, принимается следующий порядок расчета:

1. Составляется схема замещения системы, в которой турбогенераторы, синхронные компенсаторы и гидрогенераторы с успокоительными контурами замещаются своими сверхпереходными реактивными сопротивлениями x_d'' в относительных единицах. Гидрогенераторы без успокоительных контуров замещаются переходными реактивными сопротивлениями x_d'. Вводятся также реактивные сопротивления других элементов системы (трансформаторов, реакторов, линий), за исключением реактивности нагрузок, которая в начале расчета, как было указано выше, не учитывается.

Все элементы схемы замещения системы приводятся к базисным условиям, например к $S_б = 100$ МВА.

2. Э. д. с. всех генераторов станций и синхронных компенсаторов, расположенных по одну сторону линии, принимаются одинаковыми, совпадающими по фазе и равными $E = 1{,}05$. Векторы э. д. с. генераторов и компенсаторов,расположенных по одну сторону включаемой линии, предполагаются сдвинутыми на 180° по отношению к таковым по другую ее сторону.

3. Схема замещения системы упрощается и в конечном счете приводится к виду двух эквивалентных станций, связанных между собой несинхронно включаемой линией.

4. Ток несинхронного включения $I_{нс}$ определяется приближенно, без учета апериодической составляющей, по формуле

$$I_{нс} = \frac{U + E}{x_1 + x_2} = \frac{U + E}{x_{рез}}, \qquad (11.4)$$

где $I_{нс}$ — максимальное значение периодической составляющей тока при несинхронном включении (с углом расхождения векторов э. д. с. 180°) в относительных единицах;

U — напряжение на шинах системы большой мощности, принимаемое равным 1,05;

E — э. д. с. генераторов и компенсаторов (в случае учета нагрузки э. д. с. E представляет собой эквивалентную э. д. с. генераторов и нагрузки в сверхпереходном режиме);

$x_{рез}$ — результирующее реактивное сопротивление эквивалентной схемы замещения всей системы;

x_1 и x_2 — сопротивления разделившихся частей системы.

5. Полученный по формуле (11.4) ток несинхронного включения $I_{нс}$ распределяется по генераторам, синхронным компенсаторам и трансформаторам в обеих частях системы в соответствии с известными формулами токораспределения.

Чтобы значение тока несинхронного включения, приходящееся на долю рассматриваемого элемента, можно было сравнивать с номинальным током последнего, это значение должно быть отнесено к мощности рассматриваемого элемента путем умножения на отношение $\frac{S_б}{S_н}$. Это вытекает из того, что определяемый по формуле (11.4) ток был получен при реактивных сопротивлениях, приведенных к базисным условиям путем умножения каждого из этих сопротивлений на отношение $\frac{S_б}{S_н}$.

6. По неравенствам (11.2) и (11.3) определяются максимально допустимые значения кратности тока несинхронного включения, приходящегося на долю данного генератора, синхронного компенсатора или трансформатора.

7. Из сравнения полученных в результате распределения токов, возникающих при несинхронном включении в генераторах, синхронных компенсаторах и трансформаторах, с токами, допустимыми для них, делается вывод о допустимости применения НАПВ на рассматриваемой линии. При этом необходимо учитывать следующее обстоя-

тельство. Если часть генераторов или трансформаторов ремонтируется или отключена в резерв, то кратность тока несинхронного включения, приходящаяся на оставшиеся в работе генераторы или трансформаторы, увеличивается. Поэтому для электростанций или частей системы, для которых кратности тока несинхронного включения, определяемые по формуле (11.2) или (11.3), близки к предельно допустимым значениям, условие допустимости несинхронного включения линии проверяется при работе на электростанции или в части системы наименьшего возможного в эксплуатации количества генераторов или трансформаторов.

8. Если в результате указанных расчетов окажется, что применение НАПВ на данной линии допустимо, то на этом расчет заканчивается. Если же токи несинхронного включения в тех или иных генераторах, синхронных компенсаторах или трансформаторах превышают допустимые значения, то следует дополнительно провести уточненный расчет с учетом нагрузки.

Повторное включение без проверки синхронизма отключившейся линии должно происходить автоматически с помощью специального устройства НАПВ. В тех же случаях, когда несинхронное включение линии по расчету допустимо, но почему-либо устройство НАПВ не работает или не установлено, дежурный персонал должен [11-7] производить немедленное обратное включение таких линий от руки без проверки синхронизма.

При решении вопроса о внедрении НАПВ следует принимать меры предотвращения неправильной работы релейной защиты на смежных участках сети под влиянием толчков тока несинхронного включения.

ПОВЕДЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ НАПВ

Как уже было сказано, при несинхронном включении может возникать асинхронный режим. Этот режим сопровождается качаниями, которые приводят к резким скачкообразным изменениям полнофазных токов и напряжений. Кроме того, в момент включения могут кратковременно появляться составляющие тока и напряжения обратной и нулевой последовательностей фаз, обусловленные неодновременным замыканием контактов выключателей. Отсюда следует:

а) все релейные защиты, принципиально подверженные влиянию качаний, обусловленных нарушением устойчивости системы, могут приходить в действие и при НАПВ;

б) все защиты, реагирующие на токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей фаз, действующие без выдержки времени, могут неправильно действовать при НАПВ;

в) направленная защита с высокочастотной блокировкой типа ПЗ-164 также может неправильно действовать при НАПВ. Пуск защиты происходит при появлении несимметрии. При исчезновении несимметрии происходит переключение реле направления мощности на полнофазные ток и напряжение по 90-градусной схеме и защита может действовать так же, как и при симметричных коротких замыканиях на защищаемом участке [11-8];

г) принципиально не подвержены влиянию НАПВ лишь дифференциальные токовые защиты всех типов, в том числе и дифференциально-фазные защиты, например защита типа ДФЗ-2.

Более полные данные о поведении релейной защиты при НАПВ, полученные на основе специального исследования, приведены в литературе [11-9, 11-10].

Отметим, что к настоящему времени еще нет окончательных рекомендаций по выполнению защиты линий, оборудованных устройствами НАПВ. Этот вопрос находится в стадии разработки и проверки в условиях эксплуатации.

ПОВЕДЕНИЕ ПРИ НАПВ УСТРОЙСТВ БЛОКИРОВКИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КАЧАНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НАРУШЕНИЕМ УСТОЙЧИВОСТИ

Применяемые в СССР устройства блокировки релейной защиты при качаниях, обусловленных нарушением устойчивости, основаны, как известно, на двух принципах:

а) на использовании различного во времени изменения тока и напряжения при качаниях (плавное изменение) и при коротких замыканиях (резкое изменение);

б) на использовании пуска защиты при появлении составляющих тока или напряжения обратной или нулевой последовательностей на время, достаточное для ее срабатывания, с последующей блокировкой защиты.

Из этого следует, что устройства блокировки защиты при качаниях, основанные на указанных принципах, могут приходить в действие и приводить в действие защиту не только при коротких замыканиях, но и при несинхронном включении линии НАПВ. Однако можно показать, что блокирующие устройства могут быть все же использованы для предотвращения неправильного действия защиты не только при качаниях, обусловленных нарушением устойчивости, но и при НАПВ.

Если, например, блокирующее устройство основано на принципе пуска защиты от составляющих тока или напряжения обратной или нулевой последовательностей фаз, то его можно использовать и для предотвращения действия релейной защиты при НАПВ, если его загрубить. При этом напряжение или ток срабатывания пускового органа такого устройства следует выбрать большим тока или напряжения данной последовательности в месте установки устройства, обусловленных несинхронным включением в системе. Этот способ удобно применять на участках, удаленных от несинхронно включаемой линии.

В случае невозможности отстроить защиту линии передачи, включаемой несинхронно, от влияния несинхронного включения загрублением пусковых органов блокирующего устройства*, несинхронное автоматическое повторное включение рекомендуется осуществлять в следующем порядке.

---

* При коротком замыкании на защищаемом участке минимальные значения тока или напряжения обратной последовательности в месте установки защиты часто бывают меньше, чем при несинхронном включении этого участка.

Линия АБ (рис. 11-1) при отсутствии встречного напряжения включается сначала с конца А. Включение с конца Б производится только при успешном включении с конца А, когда на линии не будет устойчивого короткого замыкания и реле РКН замкнет свои контакты. После успешного включения линии с конца А защита выводится из действия и, следовательно, включение линии с конца Б происходит при выведенной защите на конце А. На конце Б применяется блокировка от качаний, включающая быстродействующую защиту при коротких замыканиях на время, достаточное для ее срабатывания. Время деблокировки, т. е. время, по истечении которого защита будет снова готова к действию, должно быть выбрано с учетом цикла НАПВ.

Таким образом, к моменту несинхронного включения линии быстродействующая ее защита оказывается выведенной до истечения времени возврата блокировки. В течение этого времени отключение коротких замыканий возлагается на другие, не быстродействующие защиты или защиты, отстроенные от броска тока несинхронного включения.

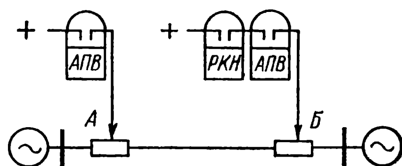


Рис. 11-1. Размещение по концам линии основных устройств АПВ частей энергосистемы без проверки синхронизма.

Схемы для НАПВ применяются в основном те же, что и для линий с односторонним питанием, приведенные выше.

Пример 1. *Дано*: в энергосистеме (рис. 11-2) намечается установить устройство НАПВ на транзитной линии, связывающей две части энергосистемы.

Параметры системы следующие: на ТЭЦ установлены генераторы $Г_1$ и $Г_2$ по 25 МВт; $\cos\varphi = 0{,}8$, $x''_d = 0{,}125$ и трансформаторы $Тр_1$ и $Тр_2$ по 31,5 МВА, $e_к = 10{,}5\%$; на ГЭС установлены генераторы $Г_3$ и $Г_4$ по 50 МВт, $\cos\varphi = 0{,}85$, $x''_d = 0{,}2$ и трансформаторы $Тр_3$ и $Тр_4$ по 60 МВА, $e_к = 10{,}5\%$; на удаленной подстанции установлены синхронный компенсатор СК мощностью 15 МВА, $x''_d = 0{,}15$ и трансформатор $Тр_5$ мощностью 60 МВА, $e_к = 10{,}5\%$; длина линий передачи $l_1 = 40$ км, $l_2 = l_3 = 25$ км, $l_4 = 100$ км; напряжение линий 110 кВ; на гидростанции установлено минимальное, реально возможное в условиях эксплуатации число генераторов и трансформаторов, — два блока.

Требуется: 1. Рассчитать ток несинхронного включения линии, соединяющей две части системы.

2. Проверить условие допустимости НАПВ для генераторов, синхронных компенсаторов и трансформаторов системы.

Решение. За базисную мощность принимаем $S_б = 100$ МВА и приводим к ней реактивные сопротивления всех элементов системы:

для генераторов

$$x_{Г_1} = x_{Г_2} = x''_d \frac{S_б \cos\varphi}{P_н} = 0{,}125 \frac{100 \cdot 0{,}8}{25} = 0{,}4$$

и

$$x_{Г_3} = x_{Г_4} = 0{,}2 \frac{100 \cdot 0{,}85}{50} = 0{,}34;$$

для синхронного компенсатора

$$x_{с.\,к} = 0{,}15 \frac{100}{15} = 1{,}0;$$

для трансформаторов

$$x_{\text{Тр}_1} = x_{\text{Тр}_2} = 0{,}105 \frac{100}{31{,}5} = 0{,}334$$

и

$$x_{\text{Тр}_3} = x_{\text{Тр}_4} = x_{\text{Тр}_5} = 0{,}105 \frac{100}{60} = 0{,}175;$$

для линий

$$x_{l_1} = 0{,}4 l_1 \cdot \frac{S_б}{U^2} = 0{,}4 \cdot 40 \frac{100}{110^2} = 0{,}132;$$

$$x_{l_2} = x_{l_3} = 0{,}4 \cdot 25 \frac{100}{110^2} = 0{,}0825$$

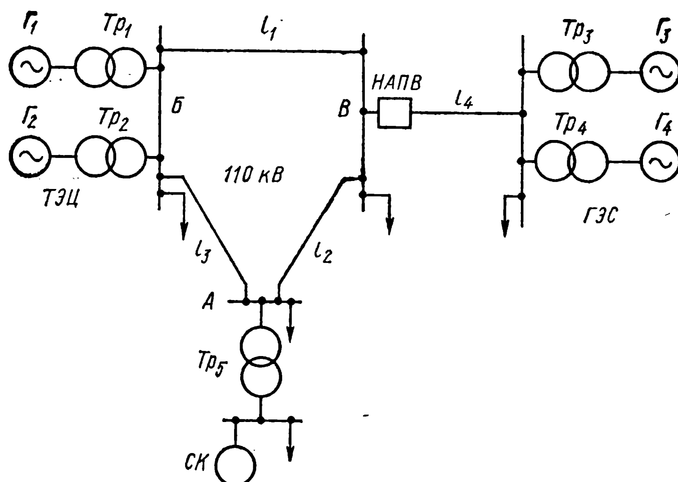


Рис. 11-2. Схема энергосистемы с транзитной линией, автоматическое повторное включение которой намечается производить без проверки синхронизма.

и

$$x_{l_4} = 0{,}4 \cdot 100 \frac{100}{110^2} = 0{,}33.$$

Полученные значения реактивностей наносим на схему замещения энергосистемы (рис. 11-3, *а*). Треугольник АБВ схемы преобразуем в эквивалентную звезду. При этом получим

$$x_А = \frac{x_{АБ} x_{ВА}}{x_{АБ} + x_{БВ} + x_{ВА}} = \frac{0{,}0825 \cdot 0{,}0825}{0{,}0825 + 0{,}132 + 0{,}0825} = 0{,}023;$$

$$x_Б = x_В = \frac{0{,}132 \cdot 0{,}0825}{0{,}297} = 0{,}037.$$

Сопротивление со стороны ТЭЦ до точки 0 эквивалентной звезды АБВ

$$\frac{0{,}4 + 0{,}334}{2} + 0{,}037 = 0{,}404.$$

Эквивалентное сопротивление блоков генератор — трансформатор ГЭС

$$\frac{0{,}34 + 0{,}175}{2} = 0{,}258.$$

Сопротивление со стороны синхронного компенсатора до точки 0 эквивалентной звезды АБВ

$$1,0 + 0,175 + 0,023 = 1,198.$$

Сопротивление со стороны ТЭЦ и СК до сборных шин несинхронно включаемой линии (рис. 11-3, *б*)

$$\frac{0,404 \cdot 1,198}{0,404 + 1,198} + 0,037 = 0,339.$$

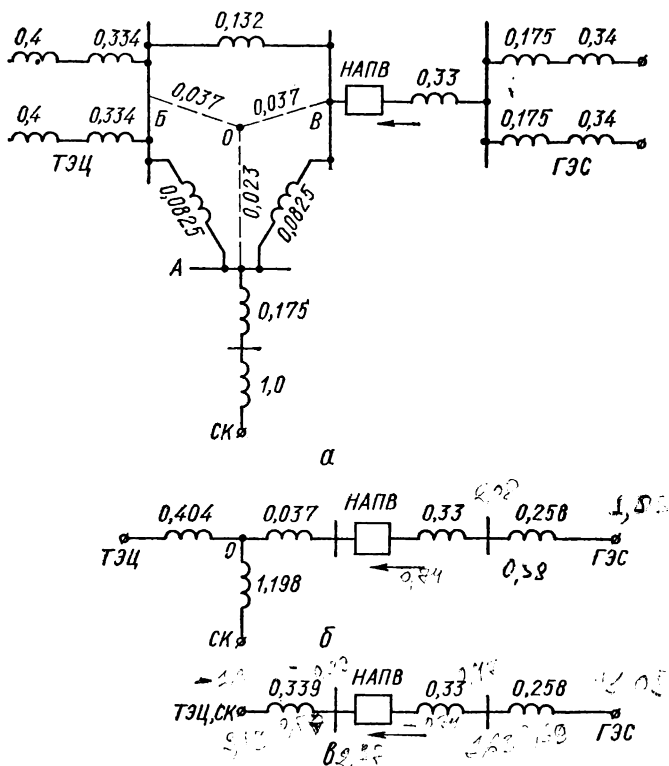


Рис. 11-3. Схема замещения энергосистемы (рис. 11-2) и ее упрощение:

а — исходная; *б* — промежуточная; *в* — упрощенная.

Тогда результирующее сопротивление схемы замещения (рис. 11-3, *в*)

$$x_{рез} = 0,339 + 0,33 + 0,258 = 0,927.$$

По формуле (11.4) при $U = E = 1,05$ определяем максимальное значение периодической составляющей тока несинхронного включения

$$I_{но} = \frac{U + E}{x_{рез}} = \frac{2,1}{0,927} = 2,265.$$

Распределяем этот ток по генераторам, синхронным компенсаторам и трансформаторам:

а) ток несинхронного включения в каждом из двух (одинаковых) генераторов ГЭС

$$I_{\text{г ГЭС}} = 0{,}5 I_{\text{нс}} \frac{S_б}{P_н} \cos\varphi = 0{,}5 \cdot 2{,}265 \frac{100 \cdot 0{,}85}{50} = 1{,}925 I_н;$$

б) ток несинхронного включения в каждом из двух (одинаковых) трансформаторов $Тр_3$ и $Тр_4$ на ГЭС

$$I_{\text{Тр ГЭС}} = 0{,}5 \cdot 2{,}265 \frac{100}{60} = 1{,}887 I_н;$$

в) ток несинхронного включения в синхронном компенсаторе

$$I_{\text{с. к}} = 2{,}265 \frac{0{,}404}{0{,}404 + 1{,}198} \cdot \frac{100}{15} = 3{,}8 I_н;$$

г) ток несинхронного включения в трансформаторе $Тр_5$

$$I_{Тр_5} = 2{,}265 \frac{0{,}404}{1{,}602} \cdot \frac{100}{60} = 0{,}95 I_н;$$

д) ток несинхронного включения в каждом из двух генераторов ТЭЦ

$$I_{\text{г ТЭЦ}} = 0{,}5 \cdot 2{,}265 \frac{1{,}198}{0{,}404 + 1{,}198} \cdot \frac{100 \cdot 0{,}8}{25} = 2{,}71 I_н;$$

е) ток несинхронного включения в каждом из двух трансформаторов $Тр_1$ и $Тр_2$ на ТЭЦ

$$I_{\text{Тр ТЭЦ}} = 0{,}5 \cdot 2{,}265 \frac{1{,}198}{1{,}602} \cdot \frac{100}{31{,}5} = 2{,}69 I_н.$$

Определяем максимально допустимые токи несинхронного включения по выражениям (11.2) и (11.4):

а) для каждого из генераторов ГЭС

$$I_{\text{г ГЭС доп}} = \frac{0{,}625}{x''_d} = \frac{0{,}625}{0{,}2} = 3{,}12 I_н;$$

б) для каждого из трансформаторов ГЭС

$$I_{\text{тр ГЭС доп}} = \frac{100}{e_к\%} = \frac{100}{10{,}5} = 9{,}5 I_н;$$

в) для синхронного компенсатора

$$I_{\text{с. к. доп}} = \frac{0{,}84}{x''_d} = \frac{0{,}84}{0{,}15} = 5{,}6 I_н;$$

г) для трансформатора $Тр_5$

$$I_{Тр_5\,\text{доп}} = \frac{100}{10{,}5} = 9{,}5 I_н;$$

д) для каждого из генераторов ТЭЦ

$$I_{\text{г ТЭЦ доп}} = \frac{0{,}625}{0{,}125} = 5 I_н;$$

е) для каждого из трансформаторов ТЭЦ

$$I_{\text{Тр ТЭЦ доп}} = \frac{100}{10{,}5} = 9{,}5 I_н.$$

Сравнивая токи несинхронного включения, протекающие в генераторах, синхронном компенсаторе и трансформаторах с максимально допустимыми для них токами, определяемыми по условиям допустимости (11.2) и (11.3), находим, что получающиеся при несинхронном включении токи во всех случаях меньше, чем допустимые, следовательно, применение НАПВ на рассматриваемой линии допустимо.

Пример 2. *Дано*: на линии передачи 110 кВ (рис. 11-4, *а*) намечается применить несинхронное включение станции мощностью 50 МВт в систему большой мощности. К сборным шинам станции подключена нагрузка мощностью 75 МВт, т. е. значительно превышающая мощность данной станции. Все параметры оборудования приведены на схеме (рис. 11-4, *а*).

Требуется: определить допустимость применения НАПВ на данной линии.

Решение. Расчет условий допустимости выполняем известным из примера расчета первым способом, без учета нагрузки.

Реактивные сопротивления, приведенные к базисной мощности $S_б = 100$ МВА, показаны на схеме замещения (рис. 11-4, *б*).

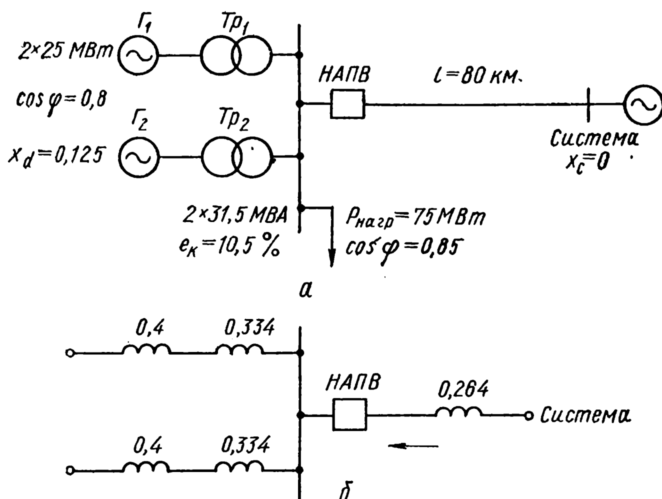


Рис. 11-4. Схема электростанции, включаемой без проверки синхронизма на систему большой мощности (*а*), и ее схема замещения без учета нагрузки (*б*).

Результирующее сопротивление в схеме замещения

$$x_{рез} = \frac{0,4 + 0,334}{2} + 0,264 = 0,631.$$

Тогда максимальное значение тока несинхронного включения, определяемое по формуле (11.4) при $U = E = 1,05$,

$$I_{нс} = \frac{U + E}{x_{рез}} = \frac{1,05 + 1,05}{0,631} = 3,33.$$

При этом ток несинхронного включения в каждом из двух (одинаковых) генераторов станции

$$I_{нс. г} = 0,5 I_{нс} \frac{S_б \cos\varphi}{P_н} = 0,5 \cdot 3,33 \frac{100 \cdot 0,8}{25} = 5,328 I_н > \frac{0,625}{x_d} = \frac{0,625}{0,125} = 5 I_н,$$

т. е. превышает допустимое по условию (11.2) значение. Тогда сделаем дополнительный расчет условий допустимости НАПВ — расчет с учетом нагрузки. Номинальную реактивность нагрузки принимаем равной 0,35 и э. д. с. нагрузки $E_{нагр} = 0,9$ (см. выше).

Реактивное сопротивление нагрузки, приведенной к базисной мощности $S_б = 100$ МВА,

$$x_{нагр} = 0{,}35 \frac{S_б \cos\varphi}{P_{нагр}} = 0{,}35 \frac{100 \cdot 0{,}85}{75} = 0{,}397.$$

Схема замещения с учетом нагрузки приведена на рис. 11-5. Упрощаем схему замещения.

Эквивалентное сопротивление блоков генератор — трансформатор станции

$$x_{г1,2} = \frac{0{,}4 + 0{,}334}{2} = 0{,}367.$$

Эквивалентное сопротивление блоков станции и нагрузки

$$x_э = \frac{0{,}367 \cdot 0{,}397}{0{,}367 + 0{,}397} = 0{,}191.$$

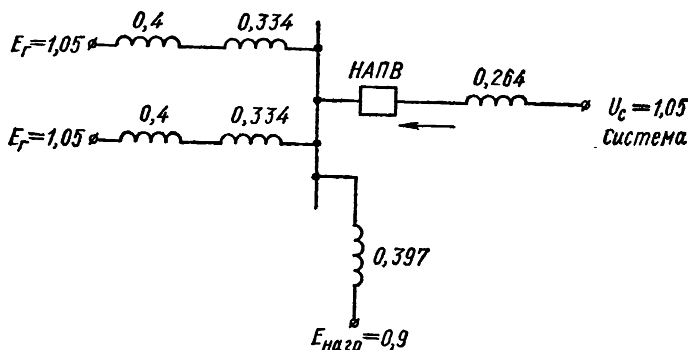


Рис. 11-5. Схема замещения электростанции (рис. 11-4) с учетом нагрузки.

Эквивалентная э. д. с. генераторов станции и нагрузки

$$E_э = \frac{E_г x_{нагр} + E_{нагр} x_{г1,2}}{x_{нагр} + x_{г1,2}} = \frac{1{,}05 \cdot 0{,}397 + 0{,}9 \cdot 0{,}367}{0{,}397 + 0{,}367} = 0{,}977.$$

Результирующее сопротивление схемы замещения (при сопротивлении системы большой мощности $x_c = 0$)

$$x_{рез} = x_э + x_l = 0{,}191 + 0{,}264 = 0{,}455.$$

Тогда максимальное значение тока несинхронного включения по выражению (11.4)

$$I_{нс} = \frac{U + E_э}{x_{рез}} = \frac{1{,}05 + 0{,}977}{0{,}455} = 4{,}45.$$

При этом ток несинхронного включения в каждом из двух одинаковых генераторов станции

$$I_{нс} = 0{,}5 I_{нс} \frac{x_{нагр}}{x_{нагр} + x_{г1,2}} \cdot \frac{S_б \cos\varphi}{S_г} = 0{,}5 \cdot 4{,}45 \frac{0{,}397}{0{,}367 + 0{,}397} \cdot \frac{100 \cdot 0{,}8}{25} =$$

$$= 3{,}7 I_н < \frac{0{,}625}{x_d} = \frac{0{,}625}{0{,}125} = 5 I_н.$$

Следовательно, уточненный расчет тока несинхронного включения с учетом нагрузки показывает, что применение НАПВ на рассматриваемой линии связи станции с системой большой мощности (рис. 11-4, *а*) допустимо.

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ (БАПВ)

Другой разновидностью несинхронного включения является быстродействующее автоматическое повторное включение. Если повторное включение выполнить весьма быстро, т. е. при незначительном расхождении векторов э. д. с. частей энергосистемы, то при этом толчки уравнительного тока могут не превышать допустимых значений и машины могут спокойно, без значительных качаний и асинхронного хода втянуться в синхронизм. Такое включение стало возможным с появлением конструкций воздушных выключателей, выполняемых на напряжение 110 кВ и выше. Эти выключатели позволяют производить повторное включение с бесконтактной паузой, не превышающей 0,2—0,3 с, т. е. с паузой минимально допустимой по условиям деионизации дуги в месте короткого замыкания.

Время действия быстродействующих защит, работающих в схемах БАПВ, следующее:

а) высокочастотные защиты (дифференциально-фазные и др.) 0,06—0,08 с;

б) отсечки 0,08—0,12 с;

в) быстродействующие фильтровые нулевой и обратной последовательностей фаз 0,08—0,12 с.

Для большинства воздушных выключателей на 110 кВ и выше время гашения дуги в выключателе, т. е. время от подачи команды на отключение до момента окончательного погасания дуги не превышает 0,07—0,08 с. Время деионизации среды в месте повреждения после погасания дуги на линии 110 кВ составляет 0,15 с. Тогда, например, при дифференциально-фазной защите линии 110 кВ весь промежуток времени с момента возникновения повреждения до завершения повторного включения составляет $(0{,}06 \div 0{,}08) + (0{,}07 \div 0{,}08) + 0{,}15 = 0{,}28 \div 0{,}31$ с. БАПВ с таким временем значительно уменьшает толчки уравнительных токов по сравнению с обычным АПВ, обеспечивающим включение только через 0,8 с.

Известны две разновидности воздушных выключателей: выключатели с внешним отделителем рубящего типа и выключатели с внутренним воздухонаполненным отделителем. В СССР выключатели с внешним отделителем широко применялись с 1945 по 1960 год. Вследствие выявившихся недостатков этих выключателей и прежде всего в связи с трудностями их работы в условиях гололеда (происходит заклинивание внешнего отделителя), их производство как в СССР, так и за рубежом было прекращено.

Появились воздушные выключатели с внутренними отделителями, расположенными внутри фарфорового изолятора [11-11]. Контакты этих отделителей замыкаются под действием пружины, а размыкаются сжатым воздухом. Внешний вид одной фазы такого выключателя на 110 кВ показан на рис. 11-6.

Над левой частью резервуара со сжатым воздухом *1* на полом опорном изоляторе *2* установлено дугогасительное устройство *3*, состоящее из двух одинаковых элементов. Над правой частью того же резервуара на опорном изоляторе *6* установлен отделитель *4*. Дугогасительное устройство и отделитель электрически связаны между собой токопроводом *5*. Под изолятором *2* расположен дутьевой клапан *, связанный с помощью системы воздухопроводов как с гасительной камерой *3*, так и с отделителем *4*. Все элементы управления выключателя размещены в шкафу *7*.

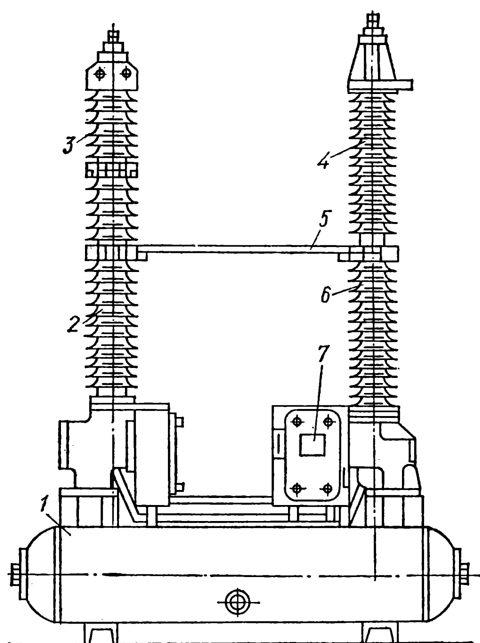


Рис. 11-6. Воздушный выключатель с вертикальным расположением дугогасительного устройства и с воздухонаполненным отделителем на 110 кВ, 2000 А, 6000 МВА.

При включенном положении выключателя сжатого воздуха в гасительном устройстве *3* и в отделителе *4* нет, их контакты под действием пружин замкнуты. При отключении выключателя сжатый воздух из дутьевого клапана одновременно поступает в дугогасительное устройство *3*, где он разводит контакты и гасит дугу, и в пусковой клапан отделителя, который посредством главного клапана открывает доступ сжатому воздуху в отделитель *4*. Сжатый воздух, заполнивший отделитель, разводит его контакты на необходимое расстояние. При этом закрывается дутьевой клапан, поступление сжатого воздуха в дугогасительное устройство прекращается и его контакты смыкаются. Что же касается контактов отделителя, то они остаются открытыми, поскольку главный клапан отделителя остается открытым и отделитель заполнен сжатым воздухом.

При включении выключателя необходимо закрыть главный клапан отделителя, а также выпустить из отделителя сжатый воздух. Тогда под действием пружины контакты отделителя замкнутся и выключатель включится.

Управление воздушными выключателями осуществляется с помощью специальных систем или механизмов управления. Известно несколько разновидностей механизмов управления, из которых наибольшее распространение получили механизмы с пневматической передачей. Механизм

* Как дутьевой клапан, так и упомянутые ниже пусковой и главный клапаны отделителя на рис. 11-6 не показаны.

управления обеспечивает как нормальные операции с выключателем, так и быстродействующее повторное включение. На рис. 11-7 представлена схема механизма управления с пневматической передачей для одной фазы выключателя с воздухонаполненным отделителем. Поло-

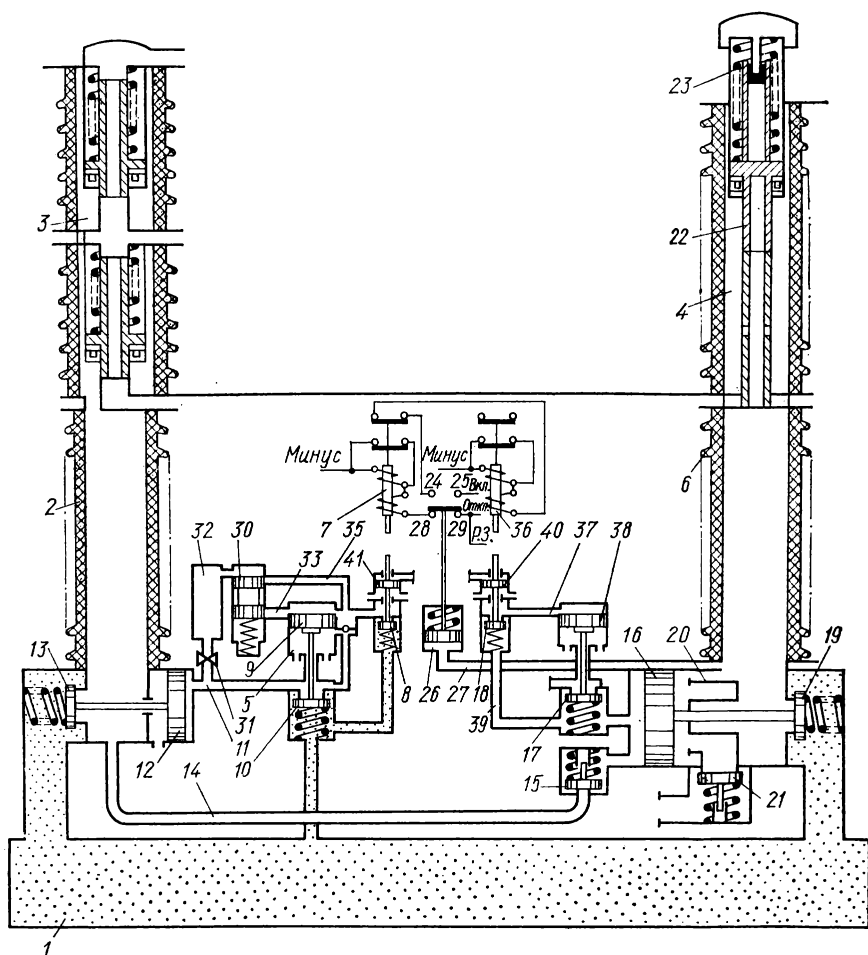


Рис. 11-7. Схема механизма управления воздушным выключателем с пневматической передачей.

жение элементов механизма управления на схеме соответствует включенному состоянию выключателя. Рассмотрим поочередно процесс отключения и включения выключателя.

О т к л ю ч е н и е. От ключа управления или от релейной защиты через контакты *28—29* подается плюс от источника оперативного тока на обмотку электромагнита отключения *7*, минус к которой подведен

жестко. Электромагнит срабатывает, его сердечник опускается вниз и открывает пусковой клапан *8*. Из этого клапана сжатый воздух устремляется в пространство над поршнем *9* и перемещает последний вниз. При этом открывается клапан отключения *10*, и сжатый воздух из резервуара *1* по трубке *11* попадает в пространство справа от поршня *12*. Последний перемещается влево и открывает дутьевой клапан *13*. Из резервуара *1* через дутьевой клапан и полый изолятор *2* сжатый воздух попадает в дугогасительное устройство *3*, где разводит контакты и гасит возникшую между ними дугу. При расхождении контактов закрывается дутьевой клапан, прекращается поступление сжатого воздуха в дугогасительное устройство и контакты его смыкаются.

Другая часть воздуха, поступившего из резервуара *1* в дутьевой клапан *13*, ответвляется по трубке *14* к обратному клапану *15*, затем в пространство слева от поршня *16* и в клапаны *17* и *18*. Поршень *16* переместится слева направо и откроет клапан *19*. Поскольку поршень *16* переместится к корпусу *20* вплотную, то сжатый воздух, поступающий из клапана *19* в опорный изолятор *6* и в отделитель *4*, не сможет выйти в атмосферу через клапан *21*. Сжатый воздух, поступивший в отделитель, разводит его контакты путем поднятия подвижного контакта *22* до упора в резиновый буфер *23*. При этом обеспечивается необходимая электрическая прочность промежутка между разведенными контактами отделителя. Из отделителя сжатый воздух выйти не сможет, поскольку обратный клапан *15* закрыт.

Дутьевой клапан *13* открывается лишь на промежуток времени, достаточный для поступления в гасительную камеру необходимого количества сжатого воздуха. Дутьевой клапан закрывается быстро вследствие выпуска сжатого воздуха из пространства над поршнем *9* через золотниковый клапан отсечки *30*. Происходит это следующим образом. Клапан *30* соединен с каналом *11* через регулируемый дроссель *31*. После открытия клапана *10* сжатый воздух из канала *11* поступает через дроссель *31* в объем *32*, а затем в пространство над клапаном *30*. Как только давление воздуха превысит силу пружины, клапан отсечки опустится вниз. При этом кольцевое отверстие в клапане отсечки окажется напротив канала *33* и этим откроется выход для сжатого воздуха из пространства над поршнем *9* в атмосферу. Поршень *9* поднимается вверх, клапан отключения *10* закрывается, сжатый воздух, находящийся справа от поршня *12* и в канале *11*, также будет выходить в атмосферу. Давление на поршень *12* понизится, дутьевой клапан *13* закроется, подача сжатого воздуха в дугогасительную камеру и в трубку *11* прекратится. Клапан отсечки *30* удерживается в нижнем положении за счет давления воздуха, поступающего по трубке *35* из клапана *8*.

Сигнализация об окончании операции отключения осуществляется с помощью блок-контактов *24—25*, привод *26* которых соединен трубкой *27* с клапаном *19*. После открытия последнего сжатый воздух по трубке *27* поступает под поршень привода *26* и поднимает его вверх до упора. При этом замыкаются контакты *24—25* и размыкаются контакты *28—29*, разрывая цепь электромагнита отключения *7*. Этим подготавливается цепь на включение выключателя.

В к л ю ч е н и е. От ключа управления или от релейной защиты через контакты *24—25* подается плюс от источника оперативного тока на обмотку электромагнита включения *36*, минус к которой подведен жестко. Электромагнит срабатывает, его сердечник опускается вниз и открывает пусковой клапан *18*. Из этого клапана сжатый воздух устремляется по каналу *37* в пространство над поршнем *38* и перемещает его вниз. При этом открывается клапан включения *17*, через который сжатый воздух, находящийся слева от поршня *16*, быстро выходит в атмосферу. Давление слева от поршня *16* снижается, и при определенном его значении поршень *16* передвинется влево от корпуса *20*, клапан *19* закроется. При этом через внутреннюю полость корпуса *20* и клапан *21* открывается свободный выход сжатому воздуху из отделителя в атмосферу. С понижением давления в отделителе подвижный контакт *22* под действием пружины опустится вниз и путем смыкания с неподвижным контактом осуществит включение выключателя. Контакты дугогасительного устройства в движение не приходят, оставаясь в сомкнутом состоянии с момента отключения выключателя.

В процессе выхода сжатого воздуха из отделителя давление в трубках *39* и *27* и под поршнем *26* привода блок-контактов будет понижаться. Поршень *26* под действием пружины опустится вниз, разомкнет контакты *24—25* и замкнет контакты *28—29*. Цепь электромагнита включения *36* разрывается, и его сердечник поднимается в исходное положение. Клапаны *17* и *18* при этом закрываются. Этим подготовлена цепь на отключение выключателя.

Б А П В. Как было указано выше, при включенном положении выключателя как в гасительном устройстве *3*, так и в отделителе *4* сжатого воздуха нет и их контакты под действием пружин замкнуты.

При возникновении короткого замыкания команда от релейной защиты подается на отключающий электромагнит *7*, воздействующий через описанную выше систему клапанов на впуск сжатого воздуха в гасительную камеру. Струя сжатого воздуха разводит контакты гасительной камеры и гасит возникшую между ними дугу. БАПВ осуществляется путем подачи от АПВ обычного типа команды на включающий электромагнит с временем, перекрывающим сумму двух времен — времени гашения дуги в гасительной камере выключателя и времени деионизации пространства электрической дуги в месте повреждения. Спустя это время, произойдет выпуск сжатого воздуха из отделителя, его контакты замкнутся, и поскольку к этому времени контакты гасительной камеры уже сомкнуты, то при этом цепь отключившейся линии восстанавливается.

Если короткое замыкание после отключения линии самоустранилось, то после БАПВ выключатель останется во включенном положении. Если же короткое замыкание оказалось устойчивым, то в результате действия защиты выключатель отключится повторно, но уже с выведенными цепями устройства БАПВ.

Время бесконтактной паузы, т. е. время гашения дуги в выключателе и время деионизации среды в месте повреждения следует сопоставлять с допустимым его значением по условию сохранения устойчивости параллельной работы.

За время действия защиты и время бесконтактной паузы э. д. с. по концам линии связи не должны расходиться на угол, больший предельного угла $\delta^\circ_{пр}$. Если в предаварийном (нормальном) режиме угол расхождения векторов был $\delta^\circ_н$, то приращение угла за время БАПВ будет

$$\delta^\circ_{12} = \delta^\circ_{пр} - \delta^\circ_н. \qquad (11.5)$$

С другой стороны, если при работе генераторов с нагрузкой $P_{нагр}$ на систему большой мощности произойдет разрыв линии связи, то в предположении равномерно ускоренного движения роторов изменение относительного угла в радианах [11-9] будет

$$\delta_{12} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{нагр}}{P_н} \cdot \frac{\omega_н}{T} t^2,$$

или в градусах

$$\delta^\circ_{12} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{нагр}}{P_н} \cdot \frac{2\pi f}{T} \cdot \frac{360}{2\pi} t^2;$$

при частоте $f = 50$ Гц

$$\delta^\circ_{12} = 9000 \frac{1}{T} \cdot \frac{P_{нагр}}{P_н} t^2, \qquad (11.6)$$

где T — постоянная инерция агрегата. Для агрегата турбина-генератор $T \approx 10$ с; $P_н$ и $P_{нагр}$ — соответственно номинальная мощность генератора и его нагрузка; t — время с момента возникновения короткого замыкания на линии связи до момента замыкания контактов выключателя, допустимое по условиям сохранения устойчивости, с.

Время t состоит из следующих составляющих:

$$t = t_з + t_{б.п} = t_з + t_{г.д} + t_{д.с}, \qquad (11.7)$$

где $t_з$ — время срабатывания быстродействующей защиты; $t_{б.п}$ — время бесконтактной паузы, допустимое по условиям сохранения устойчивости; $t_{г.д}$ — время гашения дуги в выключателе; $t_{д.с}$ — время деионизации среды в месте повреждения, допустимое по условию сохранения устойчивости.

Пример. *Дано*: 1. По линии 110 кВ выдается в систему большой мощности нагрузка $\frac{P_{нагр}}{P_н} = 0,5$.

2. Постоянная времени инерции вращающихся частей турбины и генератора $T = 10$ с.

3. Предельный угол расхождения векторов э. д. с. по концам линии связи $\delta^\circ_{пр} = 70°$.

4. Угол расхождения векторов в нормальном (предаварийном) режиме $\delta^\circ_н = 20°$.

5. Время срабатывания быстродействующей защиты $t_з = 0,08$ с.

6. Время гашения дуги воздушного выключателя на 110 кВ $t_{г.д} = 0,08$ с.

Требуется: определить время деионизации среды $t_{д.с}$ по условиям сохранения устойчивости параллельной работы.

Решение. Приравнивая правые части уравнений (11.5) и (11.6) и подставляя значения входящих в них величин, получим

$$70 - 20 = 9000 \frac{1}{10} 0{,}5 \cdot t^2,$$

или

$$t^2 = 0{,}111,$$

откуда $t = 0{,}333$ с.

Время бесконтактной паузы при БАПВ, допустимое по условиям сохранения устойчивости с учетом (11.7),

$$t_{б.\ п} = t - t_з = 0{,}333 - 0{,}08 = 0{,}253 \text{ с}.$$

Допустимое время деионизации среды по условиям сохранения устойчивости с учетом (11.7)

$$t_{д.\ с} = t_{б.\ п} - t_{г.\ д} = 0{,}253 - 0{,}08 = 0{,}173 \text{ с}.$$

Это время перекрывает с небольшим запасом время деионизации среды, необходимое по условиям погасания дуги, которое, как было уже указано выше, для напряжения 110 кВ составляет 0,15 с.

Глава двенадцатая

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПО ЧАСТОТЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как известно, при дефиците генераторной мощности, обусловленном отключением части генераторов системы или подключением новой нагрузки, превышающей резерв генераторной мощности, частота в системе снижается. При этом электродвигатели собственного расхода электростанций теряют часть своей мощности, производительность механизмов уменьшается, что ведет к снижению вырабатываемой генераторами мощности, к росту дефицита мощности в энергосистеме, т. е. к дальнейшему снижению частоты (лавина частоты).

Уменьшение скорости вращения агрегатов связано также со снижением возбуждения генераторов (квадратичной зависимостью), в результате чего в системе из-за возросшего потребления двигателями реактивного тока может возникнуть дефицит реактивной мощности. При снижении частоты до критической (44—45 Гц) [12-1] напряжение может уменьшиться до значения, при котором возникает так называемая лавина напряжения.

Для обеспечения нормальной работы электродвигателей собственного расхода электростанций Техническим управлением Минэнерго установлен предел допустимого снижения частоты — 48 Гц. При снижении ниже допустимого значения частота автоматически восстанавливается с помощью специальных устройств, разгружающих систему автоматическим отключением тех или иных питающих линий на подстанциях энергосистемы.

Известны два типа устройств автоматической разгрузки системы по частоте. К первому из них относятся устройства, реагирующие на абсолютные значения частоты, а ко второму — устройства, реагирующие на скорость снижения частоты.

Устройства второго типа, использующие зависимость скорости снижения частоты от возникшего дефицита мощности в системе, представляются более интересными, так как принципиально они начинают разгружать энергосистему еще до того, как частота в системе снизится до уровня, соответствующего данному дефициту мощности. Это дает возможность в какой-то мере уменьшить снижение частоты в системе, что очень важно.

К сожалению, этот тип устройств разгрузки не применяется в связи с возникшими затруднениями из-за того, что одной и той же скорости снижения частоты в разных режимах работы энергосистемы могут соответствовать неодинаковые значения дефицита мощности. Поэтому в настоящее время в энергосистемах практически используются только устройства разгрузки, реагирующие на абсолютные значения частоты.

Мощность отключаемой нагрузки зависит от уровня снижения частоты в системе, который, в свою очередь, зависит от образовавшегося дефицита мощности и, как правило, заранее неизвестный. Во избежание излишнего отключения потребителей устройства автоматической частотной разгрузки (АЧР) выполняются действующими не одновременно на всех намеченных питающих линиях, а несколькими очередями, каждая из которых отключает определенную часть нагрузки.

ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ АЧР

До недавнего времени к устройствам частотной разгрузки, как правило, предъявлялось требование избирательного отключения, в соответствии с которым устройство АЧР, имеющее несколько очередей, выполнялось так, что в первую очередь отключались наименее ответственные потребители, во вторую — ответственные, в третью — более ответственные и т. д. При этом устройства последующих очередей действуют на отключение потребителей только после того, как подействуют все предыдущие очереди, если до этого частота в системе не восстановилась до заданного значения.

В настоящее время избирательность выполняется, как правило, путем применения нескольких очередей, отличающихся между собой только уставками по частоте, т. е. путем настройки реле частоты устройств АЧР разных очередей на различные частоты срабатывания, но без подбора для каждой очереди равноценных по ответственности потребителей.

С помощью неизбирательной АЧР, т. е. без закрепления очередей за равноценными потребителями, происходит более точное соответствие фактически отключаемой мощности величине возникающего дефицита мощности в системе.

Избирательная АЧР с закреплением очередей за равноценными потребителями может оказаться целесообразной лишь в энергосистемах малой мощности либо в районах энергосистемы, где устанавли-

вается небольшое количество устройств при малом количестве очередей. В остальных случаях целесообразно применять неизбирательную АЧР.

Число очередей, отличающихся уставкой по частоте, может быть определено исходя из заданного значения уставок реле частоты первой и последней очередей. Для энергетических систем с преобладающей мощностью тепловых станций частоту срабатывания реле частоты первой и последней очередей рекомендуют принимать [12-2] соответственно $f_{ср1} = 48—47{,}8$ Гц и $f_{ср.\,n} = 45$ Гц. Для энергосистем с преобладающей мощностью гидравлических станций рекомендуют принимать $f_{ср1} = 47—46{,}7$ Гц и $f_{ср.\,n} = 45 — 44{,}7$ Гц.

Если принять ступени избирательности $\Delta f_{изб}$ всех основных* очередей устройств АЧР одинаковыми, то число очередей n разгрузки определяем из следующего, легко выводимого соотношения:

$$n = \frac{f_{ср1} - f_{ср.\,n}}{\Delta f_{изб}} + 1. \qquad (12.1)$$

Ступень избирательности по частоте устройств АЧР находим из соотношения

$$\Delta f_{изб} = 2\Delta f_{погр} + \Delta f_{сниж}, \qquad (12.2)$$

где $\Delta f_{погр}$ — погрешность реле частоты, обычно принимается 0,15—0,25 Гц;

$\Delta f_{сниж}$ — снижение частоты в течение собственного времени срабатывания устройства АЧР и выключателей. По данным ОРГРЭС наибольшее его значение принимается 0,15 Гц.

РЕГУЛИРОВОЧНЫЙ ЭФФЕКТ НАГРУЗКИ ОТ ЧАСТОТЫ

Как известно, мощность нагрузки, воспринимаемая приемниками электрической энергии, в общем случае зависит от частоты. Причем эта зависимость для различных категорий потребителей неодинаковая. Механизмы и агрегаты потребителей по степени их зависимости от частоты делятся на пять групп [12-3].

1. Осветительная нагрузка, дуговые печи, печи сопротивления и выпрямители, мощность нагрузки которых практически не зависит от частоты.

2. Металлорежущие станки, шаровые мельницы, компрессоры и другие механизмы и агрегаты, мощность нагрузки которых зависит от частоты приблизительно в первой степени.

3. Механизмы, момент сопротивления которых пропорционален частоте в первой степени: мощность нагрузки этих механизмов зависит от частоты приблизительно во второй степени.

4. Вентиляторы, циркуляционные насосы с небольшим сопротивлением статического напора, мощность нагрузки которых пропорциональна частоте в третьей степени.

5. Насосы с большим сопротивлением статического напора (например, питательные насосы электростанций), мощность нагрузки которых зависит от частоты в более высокой степени.

---

* Кроме основных очередей применяется так называемая дополнительная очередь, о которой будет сказано ниже.

Производительность всех этих групп потребителей, за исключением первой, с понижением частоты в системе уменьшается.

Обозначим составляющие общей нагрузки в долях единицы через $a, a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$ (индексы 1, 2, 3, ..., n обозначают степень зависимости данной категории нагрузки от частоты). Тогда зависимость мощности нагрузки $P_{нагр}$ энергосистемы от частоты f выразится соотношением

$$P_{нагр} = aP_{нагр.\,н} + a_1 P_{нагр.\,н} \frac{f}{f_н} + a_2 P_{нагр.\,н} \frac{f^2}{f_н^2} + \\ + a_3 P_{нагр.\,н} \frac{f^3}{f_н^3} + \cdots + a_n P_{нагр.\,н} \frac{f^n}{f_н^n}, \qquad (12.3)$$

где $P_{нагр.\,н}$ — номинальная мощность нагрузки потребителей системы;
$f_н$ — номинальная частота, равная 50 Гц.

Из этого уравнения видно, что с уменьшением частоты f нагрузка, воспринимаемая потребителями системы, уменьшается.

Таким образом, с уменьшением частоты происходит как бы саморегулирование мощности нагрузки в сторону восстановления баланса мощностей. Зависимость изменения нагрузки от частоты называют регулировочным эффектом нагрузки от частоты и определяют коэффициентом

$$k_{нагр} = \frac{\Delta P_{нагр} f_н}{P_{нагр.\,н} \Delta f}, \qquad (12.4)$$

где

$$\Delta P_{нагр} = P_{нагр.\,н} - P_{нагр};$$

$$\Delta f = f_н - f = 50 - f.$$

Продифференцировав выражение (12.3) по частоте f, получим значение отношения $\frac{\Delta P_{нагр}}{\Delta f}$, которое после подстановки в зависимость (12.4) позволяет при $f = f_н$ получить выражение для $k_{нагр}$ в более удобном виде

$$k_{нагр} = a_1 + 2a_2 + 3a_3 + \cdots + na_n. \qquad (12.5)$$

Для большинства энергосистем численное значение коэффициента регулировочного эффекта в зависимости от удельного значения нагрузки двигателей и характера вращаемых электродвигателями механизмов колеблется в пределах $k_{нагр} = 1 \div 3$. Это значит, что при снижении частоты в системе на 1% нагрузка уменьшается от 1 до 3%.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ, ПОДКЛЮЧАЕМОЙ К УСТРОЙСТВАМ АЧР

Если в выражении (12.4) значения мощности и частоты выразить в процентах их номинальных значений, то при $f_н = 100$ и $P_{нагр.\,н} = 100$

$$k_{нагр} = \frac{\Delta P_{нагр}\%}{\Delta f\%},$$

откуда

$$\Delta f\% = \frac{\Delta P_{нагр}\%}{k_{нагр}}.$$

Подставляя вместо отклонения частоты в процентах его значение, выраженное через отклонение частоты в герцах, получаем

$$\Delta f\% = \frac{\Delta f}{50} \cdot 100 = \frac{\Delta P_{нагр}\%}{k_{нагр}}.$$

Тогда выражение для отклонения частоты в герцах принимает вид

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{нагр}\%}{2k_{нагр}},$$

откуда при $\Delta f = f_н - f$ зависимость мощности нагрузки от изменения частоты

$$\Delta P_{нагр}\% = 2k_{нагр}\,\Delta f = 2k_{нагр}\,(f_н - f). \quad (12.6)$$

До недавнего времени частота восстановления $f_в$, представляющая собой частоту в системе в результате действия устройства АЧР, принималась равной номинальной (50 Гц), что приводило к излишнему отключению потребителей в процессе действия АЧР. Согласно ПУЭ [12-4], частота в системе в результате действия устройства АЧР автоматически должна восстанавливаться, как правило, в диапазоне $f_в = 48 \div 49{,}5$ Гц. Дальнейшее восстановление частоты в системе до номинальной должно производиться по указанию диспетчера системы.

В соответствии с этим формулу для отключаемой от устройства АЧР мощности $P_{откл}\%$ по аналогии с приведенным выражением (12.6) для $\Delta P_{нагр}\%$ можно записать в виде

$$P_{откл}\% = 2k_{нагр}\,(f_в - f_{ср}), \quad (12.7)$$

где $f_в$ и $f_{ср}$ — соответственно частота восстановления и частота срабатывания реле частоты, Гц.

При отключении потребителей в несколько очередей по формуле (12.7) можно определить мощность нагрузки, подключаемой к устройствам АЧР первой очереди. Для определения мощности нагрузки, подключаемой к устройствам АЧР второй, третьей и последующих очередей, формула (12.7) соответственно изменится:

$$\left.\begin{aligned} P_{откл_2}\% &= 2k_{нагр}\,(f_в - f_{ср_2})\,(1 - P_{откл_1^*}); \\ P_{откл_3}\% &= 2k_{нагр}\,(f_в - f_{ср_3})\,[1 - (P_{откл_1^*} + P_{откл_2^*})]; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ P_{откл_n}\% &= 2k_{нагр}\,(f_в - f_{ср_n})\left(1 - \sum_1^{n-1} P_{откл*}\right), \end{aligned}\right\} \quad (12.8)$$

где $P_{откл*}$ — мощность потребителей, отключаемых устройствами АЧР

соответствующей очереди, отнесенная к мощности нагрузки энергосистемы до начала снижения частоты, т. е.

$$P_{\text{откл}*} = \frac{P_{\text{откл}}\%}{100} = \frac{P_{\text{откл}}}{P_{\text{нагр. н}}}.$$

Кроме основных очередей разгрузки системы, в настоящее время применяется дополнительная очередь АЧР, которая срабатывает в том случае, если по истечении определенного времени частота в энергосистеме в результате действия основных очередей не восстанавливается до заданного значения, а «зависает» на некотором новом установившемся значении. В соответствии с ПУЭ для дополнительной очереди устройства АЧР частота срабатывания $f_{\text{ср. д}}$ реле частоты принимается равной 47—48 Гц, а выдержка времени — 15—25 с, что составляет около (2÷3) T (T — постоянная времени снижения частоты в энергосистеме).

Устройство АЧР дополнительной очереди действует следующим образом. Независимо от работы устройств основных очередей при снижении частоты энергосистемы до $f_{\text{ср. д}}$ срабатывают реле частоты дополнительной очереди и приводят в действие реле времени. Если после действия основных очередей, имеющих значительно меньшие выдержки времени, частота в системе устанавливается выше частоты уставки $f_{\text{ср. д}}$, то реле частоты и реле времени дополнительной очереди вернутся в исходное положение и подключенные к этой очереди разгрузки потребители не отключатся. Если после действия основных очередей частота в системе «зависнет» на уровне ниже уставки $f_{\text{ср. д}}$, то по истечении выдержки времени устройство АЧР дополнительной очереди отключит добавочную часть потребителей. Отключаемая мощность, необходимая для восстановления частоты от некоторого установившегося значения $f < f_{\text{ср. д}}$ до $f_{\text{в}}$, может быть определена по формуле

$$P_{\text{откл. д}}\% = 2k_{\text{нагр}}(f_{\text{в}} - f_{\text{ср. д}})\left(1 - \sum_{1}^{i} P_{\text{откл}*}\right), \qquad (12.9)$$

где $\sum_{1}^{i} P_{\text{откл}*}$ — отнесенная к мощности системы суммарная мощность нагрузки, отключаемая основными очередями, имеющими уставки, по частоте превышающие и равные уставке реле частоты дополнительной очереди $f_{\text{ср. д}}$.

Объем разгрузки, т. е. мощность нагрузки потребителей, которую следует отключить устройствами АЧР, чтобы при заданном аварийном дефиците мощности частота в энергосистеме восстановилась до значения $f_{\text{в}}$, можно определить [12-5] по формуле

$$P_{\text{откл}}\% = P_{\text{нагр}}\% - (P_0\% - P_{\text{г}}\%) - 2k_{\text{нагр}}(f_{\text{н}} - f_{\text{в}}), \qquad (12.10)$$

где $P_{\text{нагр}}\%$ — величина суммарной мощности нагрузки системы в исходном режиме в процентах мощности системы;
$P_0\%$ — суммарная генераторная мощность системы в исходном режиме, принимаемая за 100%;
$P_{\text{г}}\%$ — мощность отключившихся генераторов в процентах суммарной генераторной мощности системы.

Учитывая далее, что первые три составляющие выражения (12.10) представляют собой дефицит мощности в системе в процентах, т. е.

$$P_{\text{нагр}}\% - P_0\% + P_{\text{г}}\% = P_{\text{д}}\%, \qquad (12.11)$$

выражение (12.10) можно представить в виде

$$P_{\text{откл}}\% = P_{\text{д}}\% - 2k_{\text{нагр}}(f_{\text{н}} - f_{\text{в}}). \qquad (12.12)$$

В частности, при $P_{\text{нагр}}\% = P_0\%$ по выражению (12.11) можно получить величину дефицита мощности в начальный момент, т. е.

$$P_{\text{д}}\% = P_{\text{г}}\%. \qquad (12.13)$$

В выражения (12.7) — (12.9) для мощности, подключаемой к различным очередям разгрузки, входит $k_{\text{нагр}}$, определяемый по формуле (12.5). Если этот коэффициент ввиду отсутствия характеристик потребителей определить невозможно, то во избежание излишнего отключения присоединений его принимают наименьшим, т. е. $k_{\text{нагр}} = 1$. Если при этом после действия всех очередей устройств АЧР частота в системе из-за недостаточной отключенной мощности нагрузки не восстанавливается, то в дальнейшем ее доводит до заданного значения диспетчер.

ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ УСТРОЙСТВ АЧР

Принципиально выдержки времени всех основных очередей АЧР желательно иметь равными нулю, что позволило бы повысить эффективность АЧР и избежать излишних отключений нагрузки. Практически выполнить устройство АЧР без выдержки времени препятствуют следующие причины:

1. Ложные действия реле частоты типа ИВЧ-011 при подаче напряжения толчком, а также при резком снижении напряжения (перегорании предохранителей). Для предотвращения отключений из-за несовершенства реле частоты во всех устройствах АЧР основных очередей вводят выдержку времени не меньше 0,2—0,5 с при помощи реле времени или промежуточных реле с замедленным действием.

2. Короткие замыкания, сопровождающиеся резким увеличением активной мощности, обусловленной возросшими активными потерями в линиях. Опыт эксплуатации показал, что значительное возрастание активной мощности наблюдается при коротких замыканиях на реактированных кабельных линиях, когда напряжения в сети снижаются незначительно, а потери активной мощности от токов короткого замыкания возрастают, обусловливая появление значительной дополнительной активной нагрузки. При отсутствии вращающегося резерва в энергосистеме такая дополнительная мощность нагрузки вызывает понижение частоты в системе. В энергосистемах мощностью 100—300 МВт при значительных возрастаниях мощности частота может снижаться

до значения, при котором быстродействующие устройства АЧР приходят в действие и необоснованно отключают потребителей.

Такие отключения в значительной мере можно предотвратить, если действие устройства АЧР замедлить на время, несколько большее возможной длительности коротких замыканий.

3. Невозможность быстрой мобилизации вращающегося резерва, сосредоточенного на гидростанциях энергосистемы. В таких системах снижение частоты на некоторое время возможно даже в том случае, когда возникший дефицит активной мощности легко перекрывается мощностью вращающегося резерва. Объясняется это тем, что система регулирования гидротурбин во избежание повреждения оборудования при быстром изменении впуска воды выполняется таким образом, чтобы под действием регуляторов частоты и скорости вращения положение направляющего аппарата изменялось медленно. Это приводит к тому, что для ввода вращающегося резерва гидростанций в работу необходимо 10—15 с и больше. Отсюда следует, что хотя бы для частичного предотвращения ложной работы устройств АЧР из-за несовершенства системы регулирования гидротурбин необходимо вводить некоторое замедление.

Увеличение выдержки времени основных очередей по ПУЭ допускается всего до 5 с. Очевидно, что за эти 5 с вращающийся резерв гидростанций может быть использован только частично. Поэтому целесообразно в энергосистемах с гидростанциями повышать выдержку времени на некоторых устройствах АЧР до 10—15 с.

4. Поддержание синхронными компенсаторами и двигателями напряжения после снятия питания в цикле АПВ и АВР.

Как показали исследования, проведенные в энергосистемах (Донбассэнерго и др.), после отключения линии передачи между генерирующими точками системы и нагруженными узлами сети синхронные компенсаторы и синхронные двигатели в условиях торможения продолжают поддерживать напряжение с затухающей амплитудой и частотой. По другим данным [12-1] даже при отсутствии синхронных машин напряжение, затухающее по амплитуде и частоте, в отключившейся части сохраняется в течение 0,5—1,5 с. Происходит это за счет накопленной электромагнитной и кинетической энергии в асинхронных двигателях и в приводимых ими механизмах. Из этого следует, что после снятия питания в цикле АПВ или АВР устройства АЧР, не имеющие достаточного замедления, могут под влиянием снижения частоты подействовать неправильно и отключить некоторую часть потребителей к моменту восстановления напряжения после успешного действия АПВ или АВР. Для предотвращения подобных отключений часть устройств АЧР в данном районе сети должна выполняться с замедлением до 5 с [12-4].

В соответствии с ПУЭ часть устройств АЧР в системах должна выполняться с малыми выдержками времени, не превышающими 0,5 с или равными нулю, а другая — со значительными выдержками — до 5 с, исключая устройства дополнительной очереди АЧР, для которых она выбирается равной 15—25 с.

Расчет мощности потребителей, которые должны быть подключены к устройствам АЧР, действующим с малыми выдержками времени,

по предложению Харьковского политехнического института может быть выполнен по формуле

$$P'_{откл}\% = 100\frac{P_{д.\,макс}\% - 2k_{нагр}(f_н - f_{к.\,д})}{100 - 2k_{нагр}(f_н - f_{к.\,д})}, \qquad (12.14)$$

где $P_{д.\,макс}\%$ — максимальный дефицит активной мощности в процентах мощности нагрузки системы до снижения частоты;

$f_{к.\,д}$ — минимальное кратковременное допустимое значение частоты в процессе разгрузки ($f_{к.\,д} \geqslant f_{кр}$), Гц;

$f_{кр}$ — критическая частота, принимается не меньше 45 Гц.

Мощность потребителей, подключенных ко всем устройствам АЧР со значительной выдержкой времени, включая и дополнительную очередь,

$$P''_{откл}\% \leqslant P_{откл}\% - P'_{откл}\%, \qquad (12.15)$$

где $P_{откл}\%$ — суммарная отключаемая всеми очередями мощность при данном дефиците мощности в системе.

Если полученная по формуле (12.14) мощность $P'_{откл}\%$ окажется равной нулю или со знаком минус, то это значит, что все устройства АЧР могут быть выполнены со значительными выдержками времени.

ЧАСТОТНОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ

Для восстановления электроснабжения потребителей, необоснованно отключенных устройствами АЧР, применяется частотное автоматическое повторное включение (АПВЧ), исправляющее действие АЧР и производящее обратное включение потребителей после восстановления частоты в системе. Устройства АПВЧ играют также важную роль в сокращении времени перерыва электроснабжения потребителей, правильно отключенных устройствами АЧР вследствие дефицита мощности в энергосистеме. При этом эффективность действия АПВЧ будет тем выше, чем короче перерыв в питании потребителей. Как показывает опыт [12-1], на некоторых заводах при восстановлении питания после потери электроснабжения на время от 1 до 25 с можно сохранить до 50% мощности нагрузки.

Устройство АПВЧ устанавливают также на подстанциях, оборудованных устройствами АЧР, но не имеющих постоянного дежурного персонала и не оснащенных устройствами телеуправления со стороны диспетчерских пунктов.

Устройства АПВЧ обычно приходят в действие при восстановлении частоты до значения 49—49,5 Гц после отключения коротких замыканий или мобилизации резервной мощности на гидростанциях. Однако устройства АПВЧ не могут предотвратить повторное снижение частоты при неполной ликвидации дефицита мощности в системе. Поэтому такие устройства АПВЧ применяют не на всех устройствах АЧР.

Заслуживает внимания предложение Новочеркасского политехнического института и Мосэнерго о выполнении устройств АПВЧ с час-

тотой уставки реле частоты выше номинальной, например с частотой уставки 50,5 Гц. Такие устройства АПВЧ позволят диспетчеру после восстановления нормального режима и обеспечения достаточного резерва активной мощности кратковременно поднять частоту в энергосистеме выше номинальной, привести этим в действие все устройства АПВЧ с соответствующей уставкой и без участия дежурного персонала и использования средств телемеханики восстановить питание отключенных ранее потребителей.

СХЕМЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ И АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ

На рис. 12-1 приведена принципиальная схема АЧР без автоматического обратного включения линий. Реле частоты 1РЧ настраивается на заданную частоту. При снижении частоты до уставки реле 1РЧ оно замыкает свои контакты и подает питание на промежуточное реле

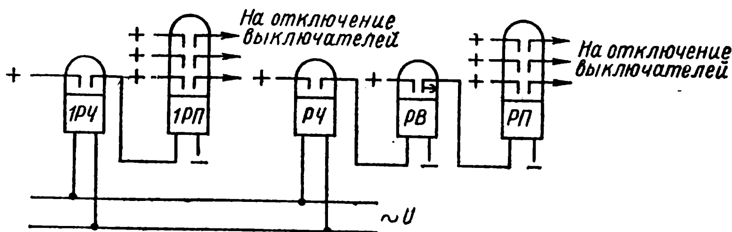


Рис. 12-1. Принципиальная схема АЧР без автоматического обратного включения линий.

1РП. Последнее срабатывает и через свои контакты подает импульс на отключение линий; у реле 1РП используется число контактов, соответствующее количеству отключаемых линий данной очереди.

На рис. 12-1 показана также принципиальная схема дополнительной очереди (реле РЧ, РВ и РП). Устройство дополнительной очереди применяется в тех случаях, когда существует опасение о невосстановлении частоты в результате действия основных очередей разгрузки. Устройство дополнительной очереди действует с выдержкой времени реле РВ от 15 до 25 с при уставке реле РЧ порядка 47—48 Гц независимо от значений уставок реле частоты основных очередей.

В небольших энергосистемах мощностью до 150 тыс. кВт частота может снижаться до 45 Гц. При таком снижении частоты успевают сработать все очереди автоматов разгрузки. В практике эксплуатации таких энергосистем начали и успешно применяют устройства АЧР с автоматическим обратным включением отключаемых линий.

Одной из разновидностей схем такого устройства является схема, разработанная применительно к типовому устройству АПВ, выпускаемому Чебоксарским электроаппаратным заводом. В этой схеме для каждой очереди разгрузки применяются по два реле частоты, одно

из которых контролирует частоту, при которой происходит отключение линий данной очереди разгрузки, а другое — частоту, при которой происходит автоматическое обратное включение.

В системе Литовэнерго применяется схема устройства АЧР, осуществляющая разгрузку несколькими очередями при использовании только одного реле частоты [12-6]. Это оказалось возможным благодаря тому, что у реле частоты, например типа ИВЧ-011 [12-7], частота срабатывания зависит от величины активного сопротивления уставки $R_у$ (рис. 12-2). Изменяя это сопротивление путем дешунтирования части его, например размыканием контактов промежуточных реле разных очередей, можно автоматически изменять уставку реле ступенями на другие, более высокие частоты. Эта схема довольно сложная, с относительно большим числом очередей разгрузки в одном устройстве АЧР.

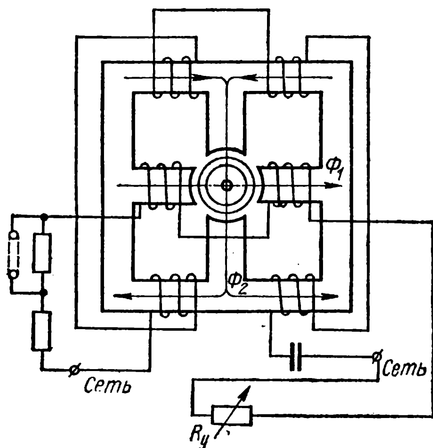


Рис. 12-2. Индукционное реле частоты типа ИВЧ-011 с автоматическим изменением уставки.

Простая схема устройства АЧР и АПВЧ Мосэнерго [12-8] для одной очереди разгрузки с последующим автоматическим включением потребителей после восстановления частоты показана на рис. 12-3.

При снижении частоты до значения уставки реле РЧ последнее срабатывает и приводит в действие реле 1РП, РВ, 2РП и 3РП. Реле 2РП срабатывает и отключает соответствующие присоединения. Реле 3РП, срабатывая, шунтирует часть сопротивления уставки реле частоты и этим изменяет уставку на другую, более высокую частоту. Реле 3РП подает также плюс на обмотку реле 4РП и снимает его с контактов. При восстановлении частоты до значения уставки реле РЧ, заданной при помощи реле 3РП, реле частоты снимает питание с обмотки реле 1РП и возвращает в исходное положение реле РВ, 2РП и 3РП. При этом через верхние контакты реле 4РП, имеющего замедление на возврате, подается плюс на реле 5РП, которое срабатывает и производит обратное включение потребителей.

Реле 6РП и 7РП устанавливаются лишь в том случае, если с помощью реле 5РП по условию нагрузки аккумуляторной батареи нельзя включить выключатели всех присоединений одновременно. Замедление на возврате реле 6РП выбирается несколько больше времени включения выключателей.

Выдержка времени реле РВ может быть обоснована и выбрана, исходя из следующих соображений. Как было указано выше, при коротком замыкании в кабельных сетях, особенно в сетях небольших энергосистем (200—300 МВт), частота может резко снижаться при

значительном увеличении мощности за счет потерь в активном сопротивлении кабелей от тока короткого замыкания. Отстроить устройства разгрузки АЧР по времени от действия релейной защиты, отключающей короткие замыкания в кабельных сетях, можно с помощью соответствующей выдержки времени реле РВ. Однако, чтобы избежать слишком большого снижения частоты при дефиците мощности в энергосистеме, эта выдержка не должна быть большой.

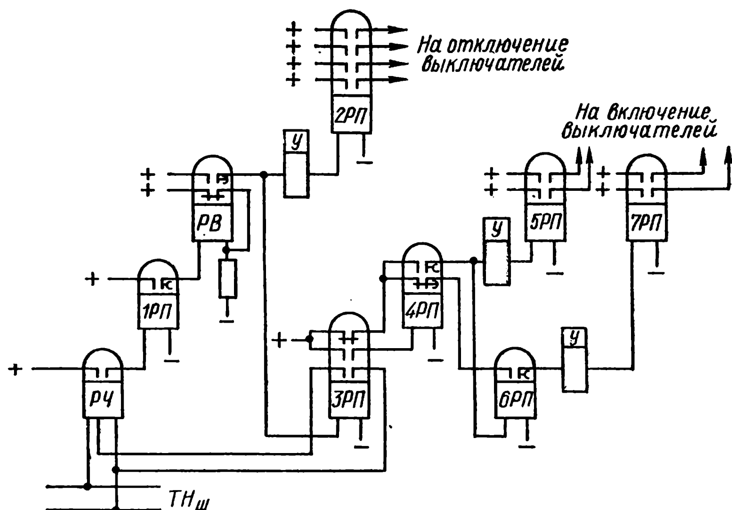


Рис. 12-3. Схема устройства АЧР и АПВЧ Мосэнерго для одной очереди разгрузки с последующим автоматическим включением потребителей после восстановления частоты:

РЧ — реле частоты типа ИВЧ-011; 1РП, 4РП, 6РП — промежуточные реле с замедлением; РВ — реле времени; 2РП, 3РП, 5РП, 7РП — промежуточные реле.

Пример 1. *Дано*: 1. В энергосистеме 300 МВт с преобладающей мощностью тепловых станций имеются нагрузки следующих категорий в долях единицы:

первой категории	$a = 0{,}2$
второй »	$a_1 = 0{,}2$
третьей »	$a_2 = 0{,}3$
четвертой »	$a_3 = 0{,}3$.

2. Устройства АЧР частотной разгрузки выполнены по принципиальной схеме, приведенной на рис. 12-3.

3. Уставка первой очереди устройства АЧР $f_{\text{ср}1} = 48$ Гц, а последней $f_{\text{ср. п}} = 45$ Гц. Все ступени избирательности по частоте принимаются равными между собой.

4. Погрешность реле частоты типа ИВЧ-011 по данным завода принимается $\Delta f_{\text{погр}} = 0{,}15$ Гц.

5. Снижение частоты в течение собственного времени срабатывания устройства АЧР и выключателей принимается $\Delta f_{\text{сниж}} = 0{,}15$ Гц.

6. Частота срабатывания реле частоты дополнительной очереди $f_{\text{ср. д}} = 47$ Гц.

7. В результате действия устройства АЧР частота в энергосистеме должна восстановиться до значения $f_{\text{в}} = 49$ Гц. Дальнейшее повышение частоты до номинального значения производится по указанию диспетчера системы.

Требуется: определить число основных очередей разгрузки; уставки срабатывания реле частоты основных очередей; мощность нагрузки отключаемой каждой из очередей устройств частотной разгрузки, включая и дополнительную очередь.

Решение. Ступень избирательности находим по выражению (12.2)

$$\Delta f_{изб} = 2\Delta f_{погр} + \Delta f_{сниж} = 2 \cdot 0{,}15 + 0{,}15 = 0{,}45 \text{ Гц}.$$

Число очередей разгрузки определяем по формуле (12.1)

$$n = \frac{f_{ср1} - f_{ср.\,п}}{\Delta f_{изб}} + 1 = \frac{48 - 45}{0{,}45} + 1 \approx 6 + 1 = 7.$$

Принимая расчетное значение ступени избирательности $\Delta f_{изб.\,расч} = 0{,}5$ Гц, получаем следующие уставки срабатывания реле частоты при семи очередях разгрузки:

$f_{ср1} = 48$ Гц $f_{ср4} = 46{,}5$ Гц

$f_{ср2} = 47{,}5$ » $f_{ср5} = 46$ »

$f_{ср3} = 47$ » $f_{ср6} = 45{,}5$ »

$f_{ср7} = 45$ Гц.

Коэффициент $k_{нагр}$, характеризующий регулировочный эффект нагрузки от частоты, находим по формуле (12.5)

$$k_{нагр} = a_1 + 2a_2 + 3a_3 + \cdots + na_n = 0{,}2 + 2 \cdot 0{,}3 + 3 \cdot 0{,}3 = 1{,}7$$

(нагрузка $a = 0{,}2$ от частоты не зависит).

Тогда мощность потребителей, отключаемая устройством АЧР первой очереди, определится по равенству (12.7)

$$P_{откл_1}\% = 2k_{нагр}(f_в - f_{ср_1}) = 2 \cdot 1{,}7\,(49 - 48) = 3{,}4\%,$$

или

$$3{,}4\,\frac{300}{100} = 10{,}2 \text{ МВт}.$$

Отключаемые мощности потребителей других основных очередей определим по уравнению (12.8)

$$P_{откл_2}\% = 2k_{нагр}(f_в - f_{ср_2})(1 - P_{откл_1^*}) = 2 \cdot 1{,}7\,(49 - 47{,}5)\left(1 - \frac{3{,}4}{100}\right) = 4{,}93\%,$$

или

$$4{,}93\,\frac{300}{100} = 14{,}79 \text{ МВт};$$

$$P_{откл_3}\% = 2k_{нагр}(f_в - f_{ср_3})[1 - (P_{откл_1^*} + P_{откл_2^*})] = 2 \cdot 1{,}7\,(49 - 47)\left[1 - \left(\frac{3{,}4 + 4{,}93}{100}\right)\right] = 6{,}23\%,$$

или

$$6{,}23\,\frac{300}{100} = 18{,}72 \text{ МВт};$$

$$P_{откл_4}\% = 2k_{нагр}(f_в - f_{ср_4})[1 - (P_{откл_1^*} + P_{откл_2^*} + P_{откл_3^*})] = 2 \cdot 1{,}7\,(49 - 46{,}5)\left[1 - \left(\frac{3{,}4 + 4{,}93 + 6{,}23}{100}\right)\right] = 7{,}26\%,$$

или

$$7{,}26\frac{300}{100}=21{,}78\ \text{МВт};$$

$$P_{\text{откл}_5}\%=2k_{\text{нагр}}(f_{\text{в}}-f_{\text{ср}_5})\left[1-\sum_1^4 P_{\text{откл}*}\right]=$$

$$=2\cdot 1{,}7\,(49-46)\left[1-\left(\frac{3{,}4+4{,}93+6{,}23+7{,}26}{100}\right)\right]=7{,}97\%,$$

или

$$7{,}97\frac{300}{100}=23{,}91\ \text{МВт};$$

$$P_{\text{откл}_6}\%=2k_{\text{нагр}}(f_{\text{в}}-f_{\text{ср}_6})\left[1-\sum_1^5 P_{\text{откл}*}\right]=$$

$$=2\cdot 1{,}7\,(49-45{,}5)\left[1-\left(\frac{21{,}82}{100}+\frac{7{,}97}{100}\right)\right]=8{,}35\%,$$

или

$$8{,}35\frac{300}{100}=25{,}05\ \text{МВт};$$

$$P_{\text{откл}_7}\%=2k_{\text{нагр}}(f_{\text{в}}-f_{\text{ср}_7})\left[1-\sum_1^6 P_{\text{откл}*}\right]=$$

$$=2\cdot 1{,}7\,(49-45)\left[1-\left(\frac{29{,}79}{100}+\frac{8{,}35}{100}\right)\right]=8{,}42\%,$$

или

$$8{,}42\frac{300}{100}=25{,}26\ \text{МВт}.$$

Суммарная мощность потребителей, отключаемая всеми семью основными очередями при значительных снижениях частоты, достигает значения

$$\sum_1^7 P_{\text{откл}}\%=3{,}4+4{,}93+6{,}23+7{,}26+7{,}97+8{,}35+8{,}42=46{,}56\%,$$

или

$$46{,}56\frac{300}{100}=139{,}68\ \text{МВт}.$$

Мощность потребителей, отключаемую дополнительной очередью, находим по выражению (12.9)

$$P_{\text{откл. д}}\%=2k_{\text{нагр}}(f_{\text{в}}-f_{\text{ср. д}})\left[1-\sum_1^i P_{\text{откл}*}\right]=$$

$$=2\cdot 1{,}7\,(49-47)\left[1-\frac{3{,}4+4{,}93+6{,}23}{100}\right]=5{,}8\%,$$

или

$$5{,}8\frac{300}{100}=17{,}4\ \text{МВт}.$$

Пример 2. *Дано*: 1. Все основные данные те же, что и в примере расчета 1. 2. В предаварийный период нагрузка в энергосистеме была $P_{\text{нагр}}\%=100\%$. Дефицит активной мощности образовался в результате отключения генераторной мощности 75 МВт, что составляет $P_{\text{д}}\%=\frac{75}{300}\cdot 100=25\%$ мощности энергосистемы.

3. Минимальная кратковременно допустимая частота в системе принимается равной критической частоте, т. е. $f_{к.\,д} = f_{кр} = 45$ Гц.

Требуется: определить объем автоматической разгрузки энергосистемы, соответствующий заданным значениям дефицита мощности и частоты восстановления, и мощность нагрузок, подключенных к устройствам АЧР с малыми и со значительными выдержками времени при заданном дефиците мощности в энергосистеме.

Решение. Мощность нагрузки, которая при заданном дефиците мощности в системе должна быть отключена устройством АЧР, чтобы частота в системе восстановилась до заданного значения $f_в = 49$ Гц, определяем по равенству (12.12)

$$P_{откл}\% = P_д\% - 2k_{нагр}(f_н - f_в) = 25 - 2 \cdot 1{,}7\,(50 - 49) = 21{,}6\%,$$

или

$$21{,}6\,\frac{300}{100} = 64{,}8 \text{ МВт}.$$

Мощность нагрузки, которая при заданном дефиците мощности в системе должна быть отключена устройствами АЧР, действующими с малыми выдержками времени, находим по формуле (12.14)

$$P'_{откл}\% = 100\,\frac{P_{д.\,макс}\% - 2k_{нагр}(f_н - f_{к.\,д})}{100 - 2k_{нагр}(f_н - f_{к.\,д})} =$$

$$= 100\,\frac{25 - 2 \cdot 1{,}7\,(50 - 45)}{100 - 2 \cdot 1{,}7\,(50 - 45)} = 9{,}64\%,$$

или

$$9{,}64\,\frac{300}{100} = 28{,}92 \text{ МВт}.$$

Предельная мощность нагрузки, которая при заданном дефиците мощности должна отключаться устройствами АЧР, действующими со значительными выдержками времени, включая и дополнительную очередь, определяем по выражению (12.15)

$$P''_{откл}\% = P_{откл}\% - P'_{откл}\% = 21{,}6 - 9{,}64 = 11{,}96\%,$$

или

$$11{,}96\,\frac{300}{100} = 35{,}88 \text{ МВт}.$$

Глава тринадцатая

РАСЧЕТ КОМПАУНДИРОВАНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Компаундированием синхронного генератора называется, как известно, дополнительное его возбуждение за счет тока статора. Достигается это тем, что выпрямленный ток статора налагается на ток, генерируемый возбудителем. В результате дополнительным током от статора генератора компенсируется значительная часть падения напряжения в сопротивлении генератора, обусловленного током статора.

На рис. 13-1 показана схема компаундирования синхронного генератора.

На выходе выпрямителя протекает ток компаундирования возбуждения $I_{к.\,в}$, необходимая величина которого обеспечивается выбором

соответствующих величин коэффициента трансформации промежуточного трансформатора (ПТ) и сопротивления $R_{уст}$ установочного реостата. Промежуточный трансформатор служит, кроме того, для разделения цепей переменного и постоянного токов, а установочный реостат — для создания нормальных условий работы генераторных трансформаторов тока ТТ.

В эксплуатации возможна работа компаундированных генераторов при отключенном корректоре напряжения или без него. Поэтому представляет интерес расчет системы компаундирования применительно к этим случаям (при включении корректора напряжения в расчет компаундирования вводятся соответствующие поправки).

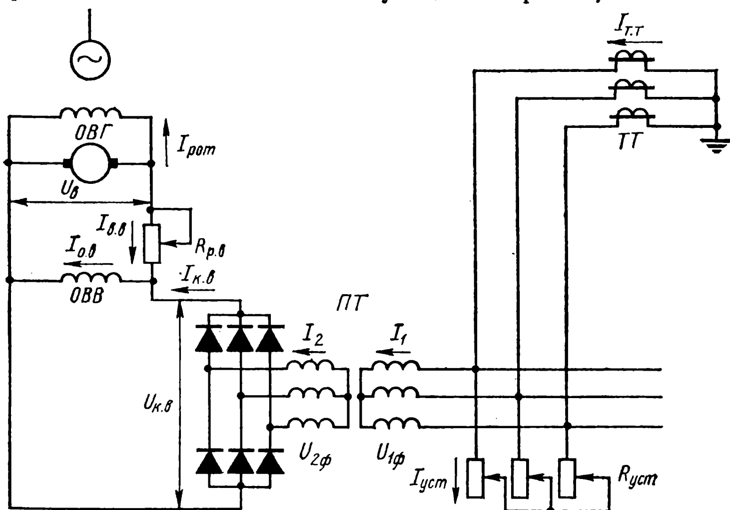


Рис. 13-1. Схема компаундирования синхронного генератора.

Наиболее полный расчет системы компаундирования производится [13-1] с учетом режима холостого хода, нормального режима работы генератора и кратковременного режима короткого замыкания (форсировки возбуждения). При этом расчет получается очень сложным, громоздким, что при ориентировочных расчетах едва ли может быть оправдано.

Для простоты рассмотрим расчет системы компаундирования применительно к номинальному режиму работы генератора. Кроме того, некоторые параметры системы компаундирования будут получены несколько упрощенным способом.

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ КОМПАУНДИРОВАНИЯ

При указанных условиях расчет системы компаундирования сведется к определению:

а) величины выпрямленного тока компаундирования $I_{к.в}$ при номинальной нагрузке генератора и шунтовом реостате возбудителя в положении холостого хода;

б) напряжения устройства компаундирования $U_{к.\ в}$;

в) числа m параллельно включаемых пластин на фазу и числа n последовательно включаемых пластин в одно плечо моста селенового выпрямителя, собранного по трехфазной мостовой схеме;

г) сопротивления шунтового реостата $r_{ш.\ р}$;

д) сопротивления установочного реостата $R_{уст}$;

е) мощности промежуточного трансформатора ПТ и некоторых других величин.

На основании схемы возбуждения (рис. 13-1) можно составить уравнения

$$U_в = I_{в.\ в}(r_{ш.\ р} + r_{о.\ в}) + I_{к.\ в} r_{о.\ в}$$

и

$$I_{в.\ в} = I_{о.\ в} - I_{к.\ в},$$

где $U_в$ — напряжение возбудителя при номинальной нагрузке генератора;

$I_{о.\ в}$ — ток в обмотке возбуждения возбудителя при номинальной нагрузке генератора;

$r_{о.\ в}$ — сопротивление обмотки возбуждения возбудителя в горячем состоянии (при $t = 60°$);

$r_{ш.\ р}$ — сопротивление шунтового реостата при номинальном напряжении и холостом ходе генератора.

Подставляя в первое из них значение тока $I_{в.\ в}$ из второго, получаем

$$U_в = (I_{о.\ в} - I_{к.\ в})(r_{ш.\ р} + r_{о.\ в}) + I_{к.\ в} r_{о.\ в},$$

откуда после преобразования находим выражение для тока компаундирования возбуждения

$$I_{к.\ в} = \frac{I_{о.\ в}(r_{ш.\ р} + r_{о.\ в}) - U_в}{r_{ш.\ р}}. \tag{13.1}$$

Сопротивление шунтового реостата $r_{ш.\ р}$ устанавливается таким, чтобы при холостом ходе на выходах генератора устанавливалось нормальное напряжение. Так как при этом ток компаундирования возбуждения $I_{к.\ в}$ отсутствует, то токи $I_{в.\ в.\ х.\ х}$ и $I_{о.\ в.\ х.\ х}$ равны между собой, следовательно, напряжение возбуждения при холостом ходе

$$U_{в.\ х.\ х} = I_{о.\ в.\ х.\ х} r_{о.\ в} + I_{о.\ в.\ х.\ х} r_{ш.\ р},$$

откуда

$$r_{ш.\ р} = \frac{U_{в.\ х.\ х} - I_{о.\ в.\ х.\ х} r_{о.\ в}}{I_{о.\ в.\ х.\ х}},$$

или

$$r_{ш.\ р} = \frac{U_{в.\ х.\ х}}{I_{о.\ в.\ х.\ х}} - r_{о.\ в}. \tag{13.2}$$

Напряжение $U_{к.\ в}$ устройства компаундирования определяем по формуле

$$U_{к.\ в} = I_{о.\ в} r_{о.\ в}. \tag{13.3}$$

Зная величины $U_{к. в}$ и $I_{к. в}$, можно определить напряжение $U_{2ф}$ и ток I_2 на стороне переменного тока устройства компаундирования следующим путем.

1. Фазное напряжение $U_{2ф}$, подаваемое на трехфазную систему выпрямления, с учетом падения напряжения на твердых выпрямителях находим из выражения

$$U_{2ф} = \frac{U_{к. в} + I_{к. в} 2R_k}{\beta_u}, \qquad (13.4)$$

где $R_k = \frac{n}{m} r_i$ — полное омическое сопротивление твердого выпрямителя, состоящего из n последовательно соединенных пластин в столбике и m параллельных столбиков в плече, при сопротивлении одной пластины, равном r_i (значение r_i определяется по каталогу);

β_u — отношение между средним выпрямленным и переменным (эффективным, фазным) напряжениями для трехфазной схемы выпрямления.

2. Вторичный ток I_2 промежуточного трансформатора ПТ получаем из выражения

$$I_2 = \frac{I_{к. в}}{\beta_i}, \qquad (13.5)$$

где $\beta_i = 1,2$ — отношение между средним выпрямленным и переменным (эффективным) токами для трехфазной схемы выпрямления.

Число параллельно включаемых пластин на фазу можно определить [13-2] по формуле

$$m = \frac{I_{к. в}}{I_{доп. дл}}, \qquad (13.6)$$

где $I_{доп. дл}$ — длительно допустимый ток через одну пластину.

Число n последовательно включаемых пластин в одно плечо моста выпрямителя, собранного по трехфазной мостовой схеме, можно определить [13-1] по формуле

$$n = \frac{\sqrt{3} I_{о. в} r_{о. в}}{\beta_u \left[U_{обр. дл} - \left(1,17 + \frac{0,359}{m} I_{к. в} \right) \right]}, \qquad (13.7)$$

где $U_{обр. дл}$ — линейное длительно допустимое обратное напряжение на одну пластину.

Значения тока $I_{доп. дл}$ и напряжения $U_{обр. дл}$ приводятся в каталогах. Для применяемых в схеме (рис. 13-1) выпрямителей с диаметром 100 мм принимают следующие значения на одну пластину: $I_{доп. дл} = 2,5$ А; $U_{обр. дл} = 10$ В.

Первичные ток I_1 и напряжение $U_{1ф}$ промежуточного трансформатора ПТ

$$I_1 = I_2 n_{п. т} \text{ и } U_{1ф} = \frac{U_{2ф}}{n_{п. т}}, \qquad (13.8)$$

где $n_{п. т}$ — коэффициент трансформации трансформатора ПТ, принимаемый обычно равным 1,0; 1,5; 2,0 (возможны и другие значения).

Определив напряжение $U_{1ф}$, следует проверить допустимость такого напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформаторов тока с точки зрения нагрева стали и погрешности в коэффициенте трансформации, зависящих от индукции в стали сердечника.

По данным ИЭ АН УССР при допустимом нагреве и при погрешности в коэффициенте трансформации, не превышающей 5%, допускается индукция для длительного режима $B_{дл} \leqslant 1Т$ (для кратковременного режима, например при коротком замыкании, $B_{кр} \leqslant 1,5$ Т).

Определяем зависимость между напряжением вторичной обмотки трансформатора тока $U_{т.\,т} = U_{1ф}$ и индукцией B:

$$U_{т.\,т} = U_{1ф} = 4,44fBqW_2 10^{-4}В,$$

или при $f = 50$ Гц для длительного режима

$$U_{1ф} = 222B_{дл}qw_2 \cdot 10^{-4},$$

откуда

$$B_{дл} = \frac{U_{1ф}10^4}{222qw_2} \text{ Т}, \qquad (13.9)$$

где q — сечение стали магнитопровода трансформатора тока, см²; w_2 — число витков его вторичной обмотки.

Если полученное по выражению (13.9) значение индукции превышает допустимое ее значение, то следует уменьшить напряжение $U_{1ф}$ путем увеличения коэффициента трансформации промежуточного трансформатора ПТ.

Ток $I_{уст}$ в установочном сопротивлении при нормальном режиме нагрузки

$$I_{уст} = I_{т.\,т} - I_1, \qquad (13.10)$$

где $I_{т.\,т}$ — номинальный вторичный ток генератора, определяемый из выражения

$$I_{т.\,т} = \frac{I_н}{n_{т.\,т}};$$

$n_{т.\,т}$ — коэффициент трансформации трансформатора тока генератора.

Величина установочного сопротивления определяется из соотношения

$$R_{уст} = \frac{U_{1ф}}{I_{уст}}. \qquad (13.11)$$

Для регулирования полное сопротивление реостата принимается с некоторым запасом.

Мощность промежуточного трансформатора ПТ на фазу

$$P_{п.\,т} = I_1 U_{1ф}, \qquad (13.12)$$

а мощность, потребляемая от трансформаторов тока,

$$P_{т.\,т} = I_{т.\,т}U_{1ф} = \frac{I_н}{n_{т.\,т}}U_{1ф}. \qquad (13.13)$$

Тогда мощность, поглощаемая в установочном сопротивлении,

$$P_{уст} = P_{т.\,т} - P_{п.\,т}, \qquad (13.14)$$

или

$$P_{уст} = I_{уст}^2 R_{уст}.$$

Пример. *Дано:* 1. Генератор $P_н = 25\,000$ кВт, $\cos\varphi = 0{,}8$, $U_н = 10{,}5$ кВ, $I_н = 1720$ А.

2. Генераторный трансформатор тока типа ТПШФ-10, предназначенный для системы компаундирования, $n_{т.\,т} = 2000/5$.

3. Напряжение возбудителя при номинальной нагрузке генератора, определяемое через ток ротора генератора при нагрузке и через сопротивление обмотки ротора при температуре 120° С, $U_в = 211{,}5$ В.

4. Ток в обмотке возбуждения возбудителя при номинальном токе нагрузки, определяемый через напряжение возбудителя $U_в$ по нагрузочной характеристике возбудителя $U_в = f(I_{о.\,в})$, равен $I_{о.\,в} = 7{,}35$ А.

5. Сопротивление обмотки возбуждения возбудителя, в которую включено компаундирование, определено при 60° С и равно $r_{о.\,в} = 14$ Ом.

6. Напряжение возбудителя при холостом ходе генератора, определяемое через ток ротора генератора при холостом ходе и через сопротивление обмотки ротора при температуре 120° С, $U_{в.\,х.\,х} = 85$ В.

7. Ток в обмотке возбуждения возбудителя при холостом ходе, определяемый через напряжение возбудителя $U_{в.\,х.\,х}$ по нагрузочной характеристике возбудителя, $I_{о.\,в.\,х.\,х} = 2{,}4$ А.

8. Коэффициент трансформации промежуточного трансформатора ПТ предварительно принимается $n_{п.\,т} = 1{,}5$.

Требуется: рассчитать систему компаундирования генератора. При этом определить:

1. Величину тока $I_{к.\,в}$ компаундирования возбуждения при номинальной нагрузке генератора и положении шунтового реостата, соответствующем режиму холостого хода.

2. Основные параметры устройства компаундирования.

Решение. Сопротивление шунтового реостата определяем по формуле (13,2), т. е.

$$r_{ш.\,р} = \frac{U_{в.\,х.\,х}}{I_{о.\,в.\,х.\,х}} - r_{о.\,в} \approx \frac{85}{2{,}4} - 14 = 21{,}4 \text{ Ом}.$$

Тогда ток компаундирования возбуждения по выражению (13.1)

$$I_{к.\,в} = \frac{I_{о.\,в}(r_{ш.\,р} + r_{о.\,в}) - U_в}{r_{ш.\,р}} = \frac{7{,}35\,(21{,}4 + 14) - 211{,}5}{21{,}4} = 2{,}28 \text{ А}.$$

Напряжение устройства компаундирования по формуле (13.3)

$$U_{к.\,в} = I_{о.\,в} r_{о.\,в} = 7{,}35 \cdot 14 = 103 \text{ В}.$$

Число параллельно включаемых пластин селенового выпрямителя на фазу определяем по выражению (13.6)

$$m = \frac{I_{к.\,в}}{I_{доп.\,дл}} = \frac{2{,}28}{2{,}5} = 0{,}91.$$

Принимаем $m = 1$.

Количество последовательно включаемых пластин в одно плечо моста выпрямителя находим по формуле (13.7)

$$n = \frac{\sqrt{3} I_{о.\,в} r_{о.\,в}}{\beta_u \left[U_{обр.\,дл} - \left(1{,}17 + \frac{0{,}359}{m} I_{к.\,в}\right)\right]} =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 7{,}35 \cdot 14}{2{,}2 \left[10 - \left(1{,}17 + \frac{0{,}359}{1{,}0} \cdot 2{,}28\right)\right]} = 10{,}1.$$

Принимаем $n = 10$.

По каталожным данным для селеновых пластин диаметром 100 мм внутреннему сопротивлению одной пластины $r_{i\,табл} = 0{,}3$ Ом соответствует максимально допустимый выпрямленный ток $I_{0\,доп} = 1{,}7$ А. При токе I_0, меньшем допустимого, внутреннее сопротивление пластины пересчитывается по приближенной формуле

$$r_i = r_{i\,табл} \sqrt{\frac{I_{0\,доп}}{I_0}}. \tag{13.15}$$

Так как в данном случае

$$I_0 = \frac{I_{к.\,в}}{3} = \frac{2{,}28}{3} = 0{,}76 \text{ А} < I_{0\,доп} = 1{,}7 \text{ А},$$

то искомое сопротивление пластины по выражению (13.15)

$$r_i = 0{,}3 \sqrt{\frac{1{,}7}{0{,}76}} = 0{,}3 \cdot 1{,}49 = 0{,}45 \text{ Ом}.$$

Полное омическое сопротивление селенового выпрямителя в плече

$$R_k = \frac{n}{m} r_i = \frac{10}{1{,}0} \cdot 0{,}45 = 4{,}5 \text{ Ом}.$$

Фазное напряжение $U_{2ф}$, подаваемое на трехфазную систему выпрямителя, определяем по формуле (13.4)

$$U_{2ф} = \frac{U_{к.\,в} + I_{к.\,в} 2R_k}{\beta_u} = \frac{103 + 2{,}28 \cdot 2 \cdot 4{,}5}{2{,}2} = 56 \text{ В}.$$

Вторичный ток I_2 промежуточного трансформатора ПТ по выражению (13.5)

$$I_2 = \frac{I_{к.\,в}}{\beta_i} = \frac{2{,}28}{1{,}2} = 1{,}9 \text{ А}.$$

Первичные ток и напряжение этого трансформатора получаем по формуле (13.8)

$$I_1 = I_2 n_{п.\,т} = 1{,}9 \cdot 1{,}5 = 2{,}85 \text{ А};$$

$$U_{1ф} = \frac{U_{2ф}}{n_{п.\,т}} = \frac{56}{1{,}5} = 37{,}3 \text{ В (на фазу)}.$$

Проверяем допустимость напряжения $U_{1ф}$ на зажимах вторичных обмоток трансформаторов тока по выражению (13.9). По справочным данным для генераторного трансформатора тока типа ТПШФ-10 с $n_{т.\,т} = 2000/5$ сечение стали сердечника $q = 19{,}1$ см^2. Число витков его вторичной обмотки численно равно коэффи-

циенту трансформации $n_{т.т} = \frac{w_2}{w_1} = w_2$, так как здесь роль первичной обмотки выполняют шины распредустройства (1 виток). Тогда по выражению (13.9)

$$B_{дл} = \frac{U_{1ф} \cdot 10^4}{222 \cdot q \cdot w_2} = \frac{37,3 \cdot 10^4}{222 \cdot 19,1 \cdot 400} = \frac{37,3 \cdot 10^4}{16,96 \cdot 10^5} = 0,22 < 1,0 \text{ Т},$$

т. е. условие допустимости удовлетворяется.

Ток в установочном сопротивлении по выражению (13.10)

$$I_{уст} = \frac{I_н}{n_{т.т}} - I_1 = \frac{1720}{2000/5} - 2,85 = 1,45 \text{ А}.$$

При этом установочное сопротивление определяем по соотношению (13.11)

$$R_{уст} = \frac{U_{1ф}}{I_{уст}} = \frac{37,3}{1,45} = 25,7 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление установочного реостата принимаем равным 28—30 Ом. Мощность промежуточного трансформатора ПТ на фазу и мощность, потребляемую от генераторных трансформаторов тока, определяем соответственно по формулам (13.12) и (13.13)

$$P_{п.т} = I_1 U_{1ф} = 2,85 \cdot 37,3 = 106 \text{ Вт}$$

и

$$P_{т.т} = \frac{I_н}{n_{т.т}} U_{1ф} = \frac{1720}{400} \cdot 37,3 = 160 \text{ Вт}.$$

Тогда мощность, поглощаемая в установочном сопротивлении, по выражению (13.14)

$$P_{уст} = P_{т.т} - P_{п.т} = 160 - 106 = 54 \text{ Вт},$$

или

$$P_{уст} = I_{уст}^2 R_{уст} = 1,45^2 \cdot 25,7 = 54 \text{ Вт}.$$

Устройство компаундирования подпитывает систему возбуждения током, который зависит от величины тока статора генератора и не зависит от фазы этого тока относительно э. д. с. генератора, от угла между его напряжением и током. Внешняя характеристика генератора $U_г = f(I_г)$ оказывается зависящей от коэффициента мощности $\cos \varphi$, т. е. от характера нагрузки, и может существенно отклоняться от ее нормального положения (рис. 13-2). Поэтому устройство компаундирования, как правило, дополняется корректором напряжения. Совместное действие устройств компаундирования и корректора напряжения позволяет поддерживать напряжение генератора на заданном уровне [13-3, 13-4].

Практически корректор выполняется либо односистемным, либо двухсистемным. В последнем случае он состоит из двух односистемных корректоров, один из которых, согласно включенный, создает в дополнительной обмотке возбуждения возбудителя намагничивающую силу того же знака, что и в основной обмотке возбуждения, а другой, противовключенный, создает во второй, дополнительной обмотке возбуж-

дения возбудителя намагничивающую силу противоположного знака. Двухсистемный корректор настраивается таким образом, что при понижении напряжения работает согласно включенный корректор, а при повышении — противовключенный, обеспечивая развозбуждение машины. Двухсистемный корректор имеет, таким образом, и мощность, и диапазон регулирования в два раза больше, чем односистемный.

Области применения компаундирования с односистемным и двухсистемным корректором различны. Обычно на турбогенераторах небольшой мощности применяется компаундирование с односистемным корректором напряжения. На всех гидрогенераторах, синхронных компенсаторах и на турбогенераторах большой мощности применяется компаундирование с двухсистемным корректором.

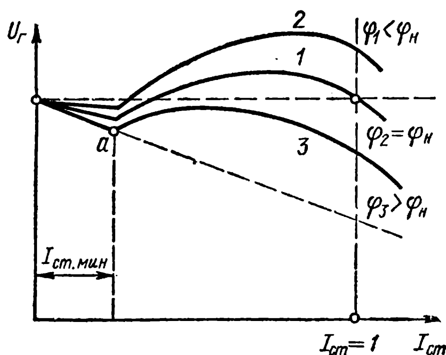


Рис. 13-2. Зависимость внешней характеристики генератора от коэффициента мощности.

Практика эксплуатации устройств компаундирования с корректором напряжения выявила следующие их недостатки:

а) электромагнитный корректор напряжения выполняется на основе магнитного усилителя значительной мощности, с большим объемом стали и, как следствие, обладает значительной инерционностью. Поэтому по быстроте действия он слабо удовлетворяет требованиям устойчивости параллельной работы генераторов;

б) для повышения мощности устройства регулирования требуется параллельное включение двух согласно включенных корректоров напряжения.

Эти и другие существенные недостатки (большое потребление мощности от трансформатора напряжения и т. д.) обусловили необходимость разработки другой разновидности компаундирования — фазового компаундирования [13-5, 13-6], которое основано на учете фазового угла между током и напряжением. Оно более точно поддерживает напряжение на зажимах генератора, и от корректора требуется значительно меньшая мощность.

ФАЗОВОЕ КОМПАУНДИРОВАНИЕ

Различие между рассмотренным выше компаундированием, иногда называемым компаундированием полным током, и фазовым компаундированием заключается в том, что в первом случае воздействия, пропорциональные току статора и напряжению, суммируются на стороне постоянного тока, т. е. после выпрямления токов, полученных от трансформаторов тока и напряжения, а во втором случае — на стороне переменного тока, т. е. до их выпрямления. Это позволяет при фазовом

компаундировании сравнительно просто учесть влияние фазового угла между током и напряжением, задача корректора облегчается, его мощность уменьшается, быстродействие возрастает.

В устройстве фазового компаундирования роль быстродействующего корректора напряжения свелась к управлению его силовой частью. Отсюда вся система автоматического регулирования возбуждения на основе фазового компаундирования получила название управляемого фазового компаундирования.

Рис. 13-3. Схема управляемого фазового компаундирования с электромагнитным корректором напряжения.

На рис. 13-3 представлена схема управляемого фазового компаундирования с электромагнитным корректором напряжения [13-3, 13-6]. Устройство состоит из двух основных органов — силового и корректора напряжения.

В силовой орган входят специальный трансформатор с подмагничиванием ТПМ и автотрансформатор АТ, в цепи которого включены дроссель Др и конденсатор *С*. На сердечнике трансформатора ТПМ размещены четыре обмотки, из которых обмотка тока Т и обмотка напряжения Н — первичные, обмотка В — вторичная и П — обмотка подмагничивания.

Обмотка Т питается от трансформаторов тока фаз *А* и *С*, соединенных на разность токов, а обмотка Н — от фаз *b* и *c* вторичной обмотки

трансформатора напряжения ТН через автотрансформатор АТ. Такое подключение должно обеспечивать автоматическое возрастание тока ротора генератора при возрастании угла φ между током и напряжением одноименных фаз на стороне статора генератора. При этом наименьшее значение тока ротора должно быть при угле $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$), а наибольшее — при $\varphi = 90°$ ($\cos \varphi = 0$).

Ток в обмотке Н должен зависеть только от напряжения генератора и не зависеть от ее сопротивления, которое может изменяться при изменении подмагничивания ТПМ от тока обмотки П. Для того чтобы эту зависимость исключить или ослабить, в цепи обмотки Н включено большое сопротивление дросселя Д с воздушным зазором, значительно превышающее сопротивление этой обмотки. Сопротивление дросселя получается большим вследствие повышения напряжения в его цепи при помощи автотрансформатора АТ. Последний служит также для уменьшения емкости конденсатора *С*, применяемого для снижения нагрузки на трансформаторы напряжения.

Линейная зависимость тока в обмотке Н от напряжения генератора необходима еще и потому, что при малых нагрузках регулирование возбуждения обеспечивается только за счет тока в обмотке Н. При наличии дросселя угол сопротивления в цепи обмотки Н составляет 60°, т. е. на этот угол ток в обмотке Н отстает от приложенного к ней напряжения, что необходимо учитывать при подборе нужного сочетания фаз тока и напряжения питания обмоток Т и Н. Это сочетание должно быть таким, чтобы при угле между током и напряжением статора генератора $\varphi = 0$ ток в обмотке Т опережал бы ток в обмотке Н на угол 90°. При этом создаваемый обмотками Т и Н результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ будет иметь наименьшее значение. При возрастании угла φ угол между токами в обмотках Н и Т будет уменьшаться, результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ будет увеличиваться и при угле $\varphi = 90°$ будет иметь наибольшее значение.

Поскольку устройство фазового компаундирования реагирует не только на изменение тока статора генератора, но и на изменение угла φ между этим током и напряжением, оно более точно поддерживает напряжение генератора, чем устройство компаундирования полным током. Но и при фазовом компаундировании с изменением тока или угла φ имеет место отклонение напряжения от заданного уровня. Поэтому устройство фазового компаундирования также дополняется электромагнитным корректором напряжения, хотя и значительно меньшей мощности.

Коррекция напряжения осуществляется путем изменения коэффициента трансформации трансформатора ТПМ. Последнее достигается путем изменения подмагничивания сердечника ТПМ выпрямленным током от измерительного трансформатора напряжения. При увеличении напряжения генератора подмагничивание ТПМ возрастает, его трансформация ухудшается, ток в обмотке возбуждения возбудителя уменьшается, напряжение генератора уменьшается, и наоборот.

Корректор напряжения состоит из трехфазного измерительного органа ТИ и магнитного усилителя МУ, на выходе которого подключена обмотка управления П трансформатора ТПМ. Трансформатор

измерительного органа ТИ имеет две обмотки: первичную, с изменяющимся в ней током I_1 по нелинейному закону ($I_{н.э}$ на рис. 13-4, *а*), и вторичную, с током I_2, изменяющимся по линейному закону ($I_{л.э}$). От этих обмоток через выпрямители нелинейного и линейного элементов ВНЭ и ВЛЭ питаются обмотки Н и Л магнитного усилителя МУ. Обмотки эти включены так, что создаваемый ими результирующий намагничивающий поток пропорционален разности токов нелинейного и линейного элементов. Устройство выполнено таким образом, что при номинальном или другом заданном значении напряжения генератора разность этих токов равна нулю, создаваемый ими результирующий намагничивающий поток равен нулю. При отклонении напряжения от заданного значения в сторону увеличения намагничивание

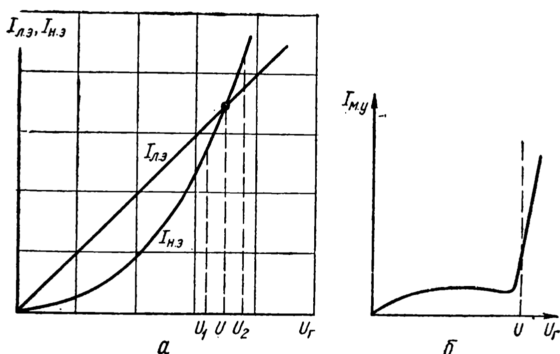


Рис. 13-4. Изменение токов в обмотках измерительного органа ТИ и тока в обмотке подмагничивания П трансформатора ТПМ:
а — ток в линейном и нелинейном элементах трансформатора ТИ; *б* — ток в обмотке подмагничивания.

сердечника трансформатора ТИ возрастает, ток нелинейного элемента становится больше тока линейного элемента (рис. 13-4, *а*), результирующий намагничивающий поток меняет знак, что приводит к резкому возрастанию тока $I_{м.у}$ магнитного усилителя (рис. 13-4, *б*), поступающего в обмотку подмагничивания П трансформатора ТПМ. При этом ток выхода регулятора $I_р = I_{вых}$, поступающий в обмотку возбуждения возбудителя, резко уменьшается. Соответствующее форсированное действие регулятора в области, близкой к напряжению $U_н$, показано на рис. 13-5.

Магнитный усилитель МУ кроме двух силовых обмоток СО с выпрямителями В имеет пять обмоток управления: Н, Л, ПОС, ТС и ВОС. О назначении основных обмоток управления Н и Л было сказано выше. Обмотка положительной обратной связи ПОС, включенная через выпрямитель ВС в цепи выхода регулятора, служит для смещения характеристики регулятора $I_р = f(U_г)$ по оси напряжения в зависимости от коэффициента мощности.

Обмотка токовой стабилизации ТС включена через выпрямитель ВТ в цепи силовой токовой обмотки Т регулятора. Служит для

изменения статизма в соответствии с требованиями распределения реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами.

Обмотка внутренней обратной связи ВОС включена согласно с обмоткой Н и встречно с обмоткой Л. При повышении напряжения генератора ток нелинейного элемента превышает ток линейного элемента (рис. 13-4, *а*), результирующая намагничивающая сила обмоток Л и Н совпадает по знаку с намагничивающей силой обмотки ВОС, что приводит к резкому возрастанию тока в обмотке подмагничивания П (рис. 13-3). Ток, поступающий в обмотку возбуждения возбудителя, уменьшается и напряжение генератора снижается. При снижении напряжения генератора, наоборот, ток линейного элемента превышает ток нелинейного элемента. В этом случае результирующая намагничивающая сила обмоток Т и Н направлена навстречу намагничивающей силе обмотки ВОС. Ток в обмотке подмагничивания П уменьшается, трансформация тока в ТПМ улучшается, ток в обмотке возбуждения возбудителя возрастает и напряжение генератора повышается.

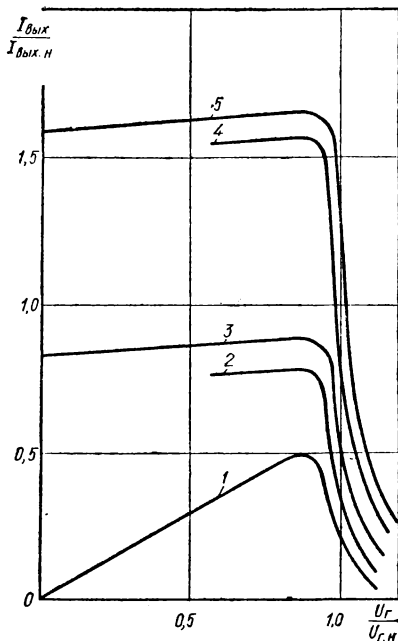


Рис. 13-5. Ток выхода регулятора возбуждения с фазовым компаундированием в зависимости от напряжения, нагрузки и коэффициента мощности.

Установочный автотрансформатор УАТ (рис. 13-3) служит для изменения уровня заданного напряжения на зажимах генератора. С помощью УАТ можно либо понизить напряжение на трансформаторе измерительного органа ТИ, либо повысить его. В первом случае измерительный орган воспримет это искусственное понижение напряжения как снижение напряжения на выводах генератора и воздействует указанным выше путем на увеличение тока возбуждения возбудителя, т. е. на повышение напряжения генератора до нового заданного значения, а во втором случае — наоборот, на понижение его.

Пример 2. *Дано:* схема управляемого фазового компаундирования, приведенная на рис. 13-3. Угол полного сопротивления цепи обмотки Н трансформатора ТПМ равен 60°. Обмотки Т и Н включены встречно.

Требуется: показать, что устройство фазового компаундирования действительно реагирует на характер нагрузки генератора, т. е. обеспечивает автоматическое изменение тока в роторе при изменении угла φ между током и напряжением одноименных фаз генератора. Показать, что силовой орган устройства подключен к трансформаторам тока и напряжения правильно.

Решение. Сначала рассмотрим случай совпадения по фазе токов и напряжений на стороне статора генератора. Для этого строим исходные векторные диаграммы токов (рис. 13-6, *а*) и напряжений (рис. 13-6, *б*). Вектор тока $I_Т$ в обмотке Т трансформатора ТПМ, представляющий собой вектор разности вторичных токов фаз *А* и *С*, будет отставать от вектора тока I_A на угол 30°. Создаваемый током $I_Т$ поток

$$\Phi_Т = kI_Т = k(\dot{I}_A - \dot{I}_C) \tag{13.16}$$

также будет отставать от тока I_A на угол 30° (рис. 13-6, *а*).

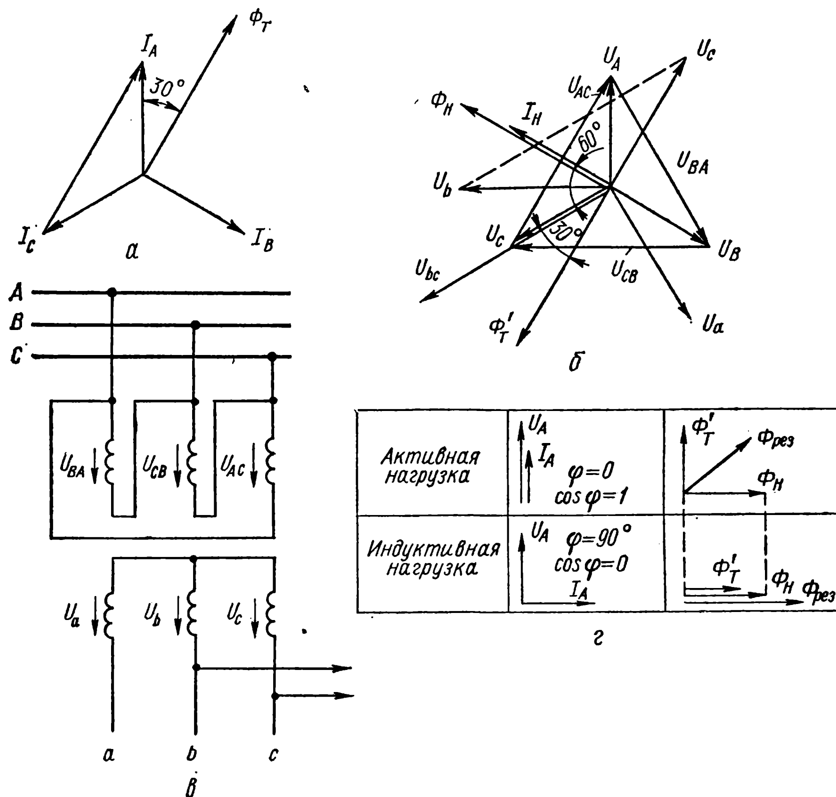


Рис. 13-6. Иллюстрация к примеру 2:

а — диаграмма токов; *б* — диаграмма напряжений; *в* — включение трансформатора ТН с указанием фазовых соотношений напряжений; *г* — результирующий поток, воздействующий на цепь ротора генератора через трансформатор ТПМ.

Первичные обмотки трансформатора напряжения включены на междуфазные напряжения генератора U_{BA}, U_{CB} и U_{AC} (рис. 13-6, *в*). С этими напряжениями на стороне звезды трансформатора ТН совпадают по фазе напряжения U_a, U_b и U_c, которые также показаны на диаграмме напряжений. На этой же диаграмме откладываем вектор напряжения $\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c$, на которое включена обмотка Н трансформатора ТПМ. Учитывая, что угол сопротивления в цепи обмотки Н равен 60°, откладываем в сторону отставания от вектора напряжения U_{bc} вектор протекающего в этой цепи тока $I_н$. В фазе с током $I_н$ откладываем вектор обусловленного им потока $\Phi_н$.

Учитывая далее, что обмотки Т и Н включены встречно, а также, что при $\varphi = 0$ ток I_A и напряжение U_A совпадают по фазе, откладываем на диаграмме напряжений вектор потока Φ'_T, равный, но противоположный по фазе вектору Φ_T.

Из диаграммы (рис. 13-6, *б*) следует, что вектор потока Φ'_T опережает на 90° поток $\Phi_н$. Геометрическая сумма потоков Φ'_T и $\Phi_н$ дает результирующий поток $\Phi_{рез}$, который при рассматриваемой чисто активной нагрузке ($\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$) будет иметь наименьшее значение (рис. 13-6, *г*). При возрастании угла φ поток $\Phi_{рез}$ будет расти и при чисто индуктивной нагрузке ($\varphi = 90°$, $\cos\varphi = 0$) будет иметь наибольшее значение (рис. 13-6, *г*).

Из изложенного следует:

1) при фазовом компаундировании, выполненном по схеме рис. 13-3, ток в роторе генератора действительно зависит от характера нагрузки;

2) устройство фазового компаундирования подключено к трансформаторам тока и напряжения правильно.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОРСИРОВКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

При глубоких снижениях напряжения, например при коротких замыканиях, восстановление напряжения генераторов с помощью одних лишь регуляторов возбуждения оказывается недостаточно быстрым по соображениям устойчивости. Поэтому на генераторах, оснащенных любыми устройствами регулирования возбуждения, включая и компаундирование, рекомендуется применение автоматической форсировки возбуждения путем замыкания накоротко сопротивления $R_{р.в}$ в цепи возбуждения возбудителя.

Принципиальная схема автоматической форсировки возбуждения показана на рис. 13-7. Уставка реле минимального напряжения РН выбирается из условия возврата реле после восстановления напряжения, т. е.

$$U_{ср} \doteq \frac{U_н}{k_н k_в n_н}, \qquad (13.17)$$

где $U_{ср}$ — напряжение срабатывания реле;

$U_н$ — номинальное напряжение генератора;

$k_в$ — коэффициент возврата реле РН ($k_в > 1$);

$k_н$ — коэффициент надежности;

$n_н$ — коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Обычно $U_{ср} = (0,8 \div 0,85)\, \frac{U_н}{n_н}$.

При снижении напряжения генератора ниже 80—85% номинального реле РН срабатывает и через блок-контакты БК подает плюс на контактор или промежуточное реле ПР, которое срабатывает и своими контактами шунтирует реостат в цепи возбуждения возбудителя. Ток возбуждения быстро возрастает до потолочного двухкратного (а иногда и выше) значения, что вызывает увеличение э. д. с. и напряжения генератора.

Для предотвращения срабатывания устройства форсировки возбуждения при перегорании предохранителей обычно применяется не

один, а два трансформатора напряжения и два реле РН с последовательным соединением их контактов.

Недостаток схемы рис. 13-7 состоит в том, что устройство приходит в действие только при трехфазном коротком замыкании и при двухфазном между теми двумя фазами, на которые включены реле. Если, например, реле РН включены на междуфазное напряжение U_{BC}, то устройство будет работать только при трехфазном коротком замыкании и при двухфазном между фазами B и C. Включить реле РН на разные междуфазные напряжения невозможно, поскольку при этом устройство блокировалось бы при двухфазных коротких замыканиях между любыми двумя фазами.

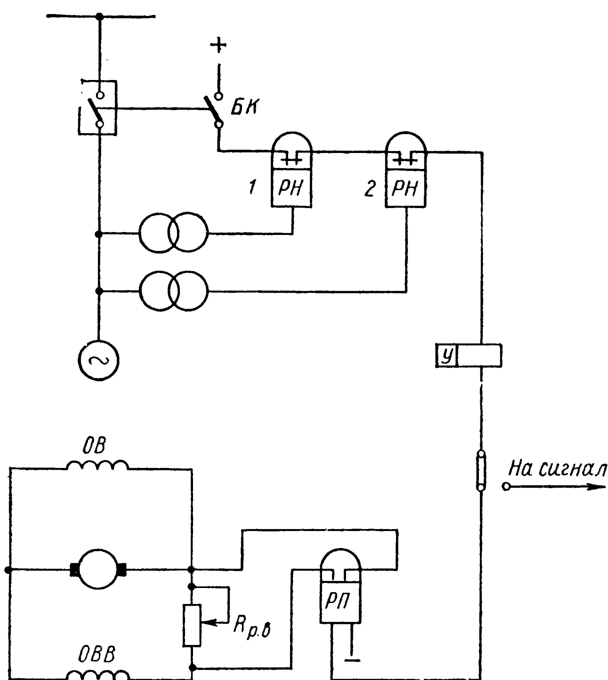


Рис. 13-7. Схема автоматической форсировки возбуждения без применения фильтров напряжения.

Более совершенной схемой форсировки возбуждения является схема, представленная на рис. 13-8, *а*. Реле минимального напряжения РН подключены к трансформаторам напряжения ТН через фильтры напряжения прямой последовательности фаз U_1. Выполненное по этой схеме устройство форсировки возбуждения действует при любом виде короткого замыкания, сопровождающемся снижением напряжения прямой последовательности фаз до уставки реле РН.

Фильтр напряжения прямой последовательности фаз нередко выполняется с помощью соответствующим образом подобранных активно-

емкостных сопротивлений, собранных по схеме, приведенной на рис. 13-8, *б*. Потенциальные диаграммы фильтра при подведении к нему системы напряжений обратной и прямой последовательностей фаз приведены соответственно на рис. 13-8, *в*, *г*. Из последней диаграммы видно, что при нормальном режиме напряжение U_{mn} на выходе фильтра

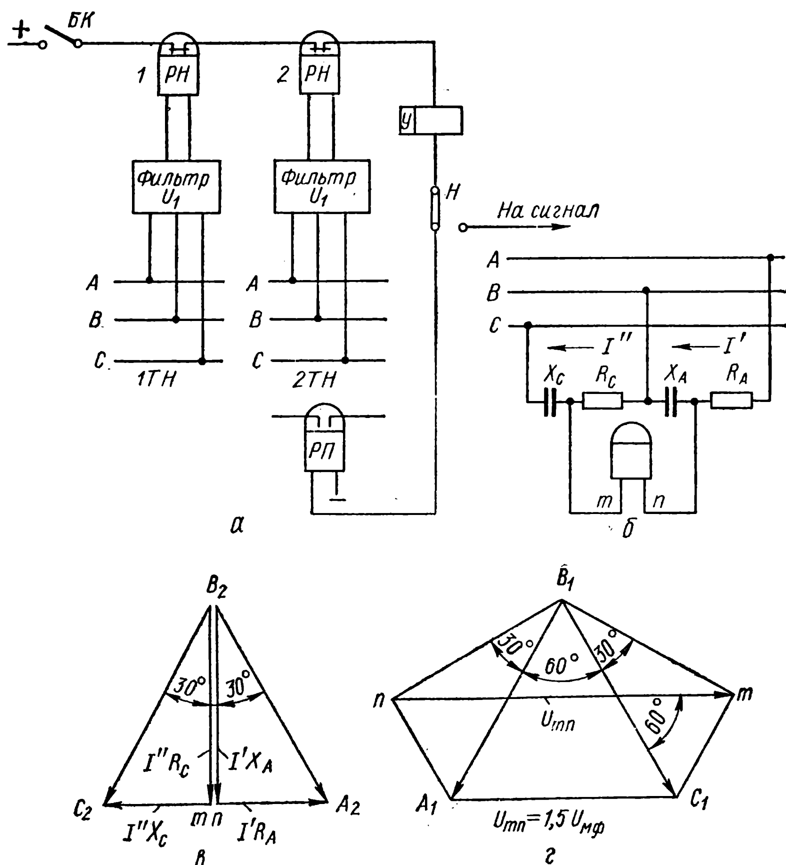


Рис. 13-8. Схема форсировки возбуждения при включении реле через фильтр напряжения прямой последовательности фаз:

а — схема форсировки; *б* — схема соединений фильтра; *в* — диаграмма напряжений при подведении на вход фильтра системы напряжений обратной последовательности фаз; *г* — диаграмма напряжений при подведении на вход фильтра системы напряжений прямой последовательности.

равно 1,5 номинального междуфазного напряжения $U_{мф}$. Этому напряжению соответствует соотношение сопротивлений фильтра

$$R_C : X_C = X_A : R_A = \frac{\sqrt{3}}{2} : \frac{1}{2}, \qquad (13.18)$$

вытекающее из диаграммы рис. 13-8, *в*.

Расчет фильтра напряжения прямой последовательности фаз выполняется совершенно аналогично расчету фильтра обратной последовательности фаз, подробно изложенному в приложении *I*. Больше того, выполненный фильтр напряжения обратной последовательности фаз превращается в фильтр прямой последовательности путем изменения очередности фаз на входе фильтра (поменять между собой концы, подключаемые к крайним фазам *A* и *C*).

Во избежание форсировки возбуждения при работе генератора на холостом ходу, т. е. при отключенном выключателе, во всех схемах форсировки возбуждения предусматривается подача плюса оперативного тока на контакты реле 1РН через блок-контакты БК, которые повторяют положение контактов выключателя и, следовательно, размыкаются при его отключении. Этим исключается недопустимое повышение напряжения статора, опасное для его изоляции.

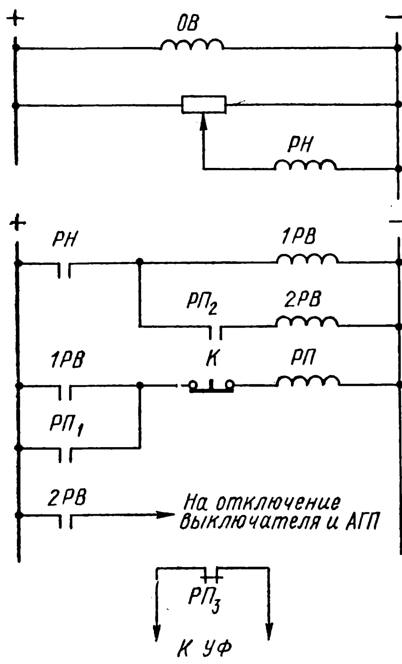


Рис. 13-9. Схема автоматического отключения устройства форсировки возбуждения.

Сохранности изоляции служат и другие мероприятия. Современные генераторы с активным использованием проводниковых материалов, имеющие форсированное охлаждение, допускают ту или иную кратность форсировки возбуждения только на непродолжительное время. Для ограничения длительности форсировки возбуждения таких генераторов существуют специальные устройства. Схема одного из них [13-8] приведена на рис. 13-9.

Уставка реле напряжения РН, включенного на напряжение обмотки возбуждения через делитель напряжения, составляет примерно 1,6 $U_н$. При превышении напряжения уставки реле РН срабатывает и запускает реле времени 1РВ. Последнее, спустя заданную выдержку времени, запускает промежуточное реле РП. Оно срабатывает и контактом $РП_1$ берет себя на самопитание, контактом $РП_2$ запускает реле времени 2РВ, а размыкающимся контактом $РП_3$ отключает устройство форсировки возбуждения. Реле времени 2РВ продолжает работать, и если, несмотря на отключение устройства форсировки, снижение напряжения до момента замыкания его контактов не последовало, оно контактом 2РВ подает импульс на отключение генератора и на аппарат гашения поля АГП.

Глава четырнадцатая

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как известно, исследование условий устойчивости системы регулирования принципиально может быть выполнено путем определения знака корней характеристического уравнения, соответствующего дифференциальному уравнению, описывающему данную систему регулирования. Система регулирования разделяется на основные элементы или звенья и составляются уравнения переходного процесса для каждого такого звена. При этом рассматривают явления при малых отклонениях регулируемой величины, что дает возможность упростить задачу и рассматривать переходные процессы в звеньях протекающими по линейному закону.

Решая полученную таким путем систему дифференциальных уравнений звеньев, можно найти линейное дифференциальное уравнение, описывающее всю систему регулирования. Полученное уравнение определяет связь между величинами на входе и выходе системы регулирования в целом, причем величины промежуточных звеньев из уравнения исключаются.

Далее определяется характеристическое уравнение, соответствующее данному дифференциальному уравнению системы, и исследуются его корни. Чтобы определить, затухают или не затухают возникшие колебания в системе регулирования, т. е. устойчива система регулирования или неустойчива, достаточно определить знаки у всех вещественных корней и у всех вещественных частей сопряженно-комплексных корней рассматриваемого характеристического уравнения.

Система регулирования будет устойчивой, если все вещественные корни и вещественные части сопряженно-комплексных корней будут отрицательными. В противном случае система регулирования будет неустойчивой.

Таким образом, для получения ответа, устойчива ли система регулирования или неустойчива, необходимо решить характеристическое уравнение. В случае сложных систем регулирования характеристические уравнения получаются высоких порядков и их решение затруднительно. Поэтому в целях облегчения решения практических задач, связанных с определением условий устойчивости системы регулирования, в разное время были выявлены те или иные признаки, позволяющие судить об устойчивости системы, не прибегая к решению характеристических уравнений. Эти признаки впоследствии получили название критериев устойчивости системы регулирования.

Задача об определении условий устойчивости линейных систем регулирования, не прибегая к решению характеристического уравнения, впервые была поставлена еще в 1868 г. Максвеллом. В 1876 г.

И. А. Вышнеградским был предложен критерий устойчивости применительно к системам регулирования, описываемым линейными дифференциальными уравнениями третьего порядка. Вопросам выявления критериев устойчивости и их обобщениям были посвящены работы Рауса, Гурвица, Найквиста, Михайлова, Соколова, Неймарка и др.

В настоящее время наиболее распространенные критерии устойчивости могут быть разделены на две основные группы:

а) алгебраические критерии, основанные на изучении знаков коэффициентов характеристического уравнения и знаков комбинаций из этих коэффициентов. Сюда относится, например, широко известный критерий Рауса — Гурвица;

б) частотные критерии, основанные на изучении расположения некоторых частотных характеристик в комплексной плоскости. Сюда относятся, например, частотный критерий А. В. Михайлова, применяемый для изучения сложных многоконтурных систем, рассматриваемых при этом в виде замкнутых систем регулирования, и критерий Найквиста — Михайлова, применяемый для простых одноконтурных систем, рассматриваемых в целях упрощения анализа в виде разомкнутых систем регулирования.

Особенностью всех частотных критериев, применение которых сопровождается графическими построениями на комплексной плоскости, является их наглядность.

Особенностью же всех критериев устойчивости регулирования, в том числе и частотных, является то, что с их помощью можно решить только один вопрос: устойчива система регулирования или неустойчива. Ответа на вопрос о качестве регулирования, т. е. о величине отклонений регулируемой величины от нормального или заданного значения, о периоде и времени затухания этих отклонений они не дают. Эти и другие вопросы, относящиеся к качеству регулирования, рассматриваются в специальных главах теории автоматического регулирования.

Несмотря на эти ограничения, критерии устойчивости играют большую роль в деле проектирования систем регулирования, позволяя без большой затраты труда и времени находить ответ на вопрос об их устойчивости.

КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАУСА — ГУРВИЦА

В 1877 г. Раус предложил метод исследования условий устойчивости в форме правила, определяющего последовательность операций, необходимых для решения задачи. Эти правила могут быть названы условием Рауса, которое применительно к линейным системам может быть сформулировано следующим образом: система регулирования, описываемая линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, будет устойчивой, если все коэффициенты характеристического уравнения будут положительными. Впоследствии выявилось, что эти условия устойчивости для общего случая недостаточны.

В 1895 г. Гурвиц показал, что условие устойчивости Рауса справедливо только для тех частных случаев, когда все корни характеристического уравнения вещественные. Для общего же случая, когда корни характеристического уравнения могут быть как вещественными, так и сопряженно-комплексными, условие устойчивости Рауса является необходимым, но недостаточным, так как оно не охватывает условия отрицательности вещественной части комплексных корней.

Гурвиц доказал, что система регулирования будет устойчивой, если все коэффициенты a_0, a_1, a_2, ..., a_n характеристического уравнения вида

$$a_0p^n + a_1p^{n-1} + a_2p^{n-2} + \cdots + a_{n-1}p + a_n = 0 \qquad (14.1)$$

положительны и если составленный по определенному закону определитель порядка $n - 1$, а также все его главные миноры также положительны.

Определитель порядка $n - 1$ должен быть построен следующим путем. По главной диагонали слева направо вниз записываются последовательно все коэффициенты характеристического уравнения (14.1), исключая первый и последний коэффициенты a_0 и a_n.

Вертикальные ряды по обе стороны этой диагонали дополняются коэффициентами этого же уравнения: вверх — по возрастающим индексам, вниз — по убывающим. Коэффициенты, индексы которых получаются больше n или меньше 0, не пишутся, а заменяются нулями. Определитель Гурвица принимает вид

$$\Delta_{n-1} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \ldots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \ldots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \ldots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \ldots & a_n \\ 0 & 0 & a_1 & \ldots & a_{n-1} \end{vmatrix}.$$

Миноры определителя последовательно уменьшающегося порядка получаются путем вычеркивания последнего столбца (справа) и последней строки (снизу).

Сформулированный Гурвицем критерий устойчивости, состоящий из условия Рауса, дополненного определителем Гурвица с его главными минорами, получил название критерия Рауса — Гурвица.

Пусть, например, система регулирования описывается линейным дифференциальным уравнением третьего порядка с постоянными коэффициентами. Ему соответствует характеристическое уравнение

$$a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0.$$

Согласно критерию Рауса — Гурвица, эта система регулирования будет устойчивой, если коэффициенты

$$a_0 > 0, \quad a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_3 > 0^*$$

---

* Отрицательность всех этих коэффициентов равнозначна их положительности, так как все характеристическое уравнение можно умножить на —1.

и определитель

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

Если же система регулирования описывается характеристическим уравнением четвертой степени

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0,$$

то по критерию устойчивости Рауса — Гурвица она будет устойчивой, если коэффициенты

$$a_0 > 0,\ a_1 > 0,\ a_2 > 0,\ a_3 > 0,\ a_4 > 0;$$

определитель

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0;$$

главный минор

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0.$$

Заметим, что определитель Δ_3 удобно решать по правилу Саррюса, добавляя справа первые два столбца, т. е. переписав его в виде

$$\Delta_3 = \left|\begin{matrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{matrix}\right|\begin{matrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \\ 0 & a_1 \end{matrix}\right| = a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_3^2 a_0 =$$

$$= a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1^2 a_4 > 0.$$

Аналогично составляются и вычисляются условия для критерия устойчивости Рауса — Гурвица и для систем регулирования, имеющих характеристическое уравнение более высокого порядка.

Пример 1. *Дано:* 1. Упрощенная схема системы регулирования напряжения (рис. 14-1) изображена на рис. 14-2 в виде замкнутой системы регулирования напряжения, состоящей из трех инерционных звеньев первого порядка, которые описываются следующими дифференциальными уравнениями в операторной форме:

звено регулятора

$$(T_1 p + 1) U_1 = k_1 (U_э - U_3); \tag{14.2}$$

звено возбудителя

$$(T_2 p + 1) U_2 = k_2 U_1 \tag{14.3}$$

и звено генератора

$$(T_3 p + 1) U_3 = k_3 U_2, \tag{14.4}$$

где U_3, U_2, U_1, $U_э$ — напряжения на выходах звеньев генератора, возбудителя, регулятора соответственно и эталонное напряжение;

T_3, T_2, T_1 — постоянные времени соответственно звеньев генератора, возбудителя и регулятора;

k_3, k_2, k_1 — коэффициенты усиления соответственно звеньев генератора, возбудителя и регулятора;

p — оператор (символ дифференцирования).

2. Генератор завода «Электросила» типа Т2-25-2, мощность $P_г = 25$ тыс. кВт, напряжение $U_г = U_3 = 6{,}3$ кВ, постоянная времени $T_г = T_3 = 9{,}9$ с.

3. Возбудитель завода «Электросила» типа ВТ-120-300, мощность $P_в = 130$ кВт, напряжение $U_в = U_2 = 250$ В, скорость нарастания напряжения 330 В/с, постоянная времени

$$T_в = T_2 = \frac{250}{300} = 0{,}76 \text{ с.}$$

4. Регулятор напряжения. Не указывая тип регулятора, примем его данные: коэффициент трансформации трансформатора напряжения, питающего регулятор, $n_н = \frac{6300}{220}$.

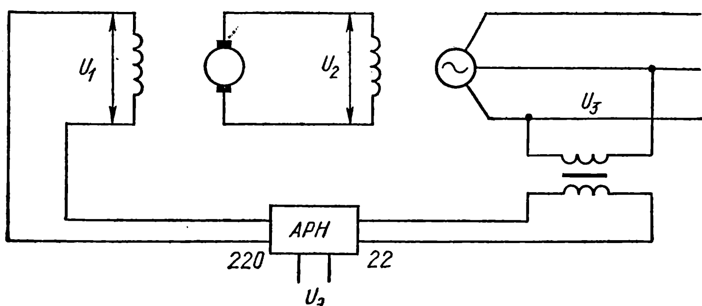


Рис. 14-1. Упрощенная схема системы регулирования напряжения.

Разность напряжений на входе регулятора между эталонным напряжением и напряжением генератора в установившемся режиме $U_{э.\,уст} - U_{3\,уст} = 22$ В; напряжение на выходе $U_р = U_1 = 220$ В; коэффициент усиления регулятора (без учета трансформатора напряжения) $k_р = \frac{220}{22} = 10$. Постоянная времени $T_р = T_1 = 0{,}5$ с.

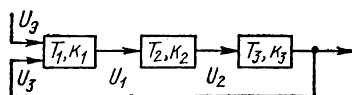


Рис. 14-2. Упрощенная схема замкнутой системы регулирования напряжения.

5. Значения коэффициентов усиления звеньев, непосредственно вытекающие из исходных данных, можно также считать заданными, а именно:

$$k_1 = \frac{k_р}{n_н} = 10\frac{220}{6300} = 0{,}35;$$

$$k_2 = \frac{250}{220} = 1{,}13;$$

$$k_3 = \frac{6300}{250} = 25.$$

Требуется: 1. Найти дифференциальное уравнение системы регулирования и определить соответствующее ему характеристическое уравнение.

2. Определить значения коэффициентов характеристического уравнения и по ним проверить устойчивость заданной системы регулирования, пользуясь критерием Рауса—Гурвица.

Решение. Перемножая между собой правые и левые части уравнений (14.2) — (14.4) звеньев, получаем дифференциальное уравнение системы регулирования в виде

$$(T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_3p + 1)U_з = k_1k_2k_3(U_э - U_з),$$

или

$$[(T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_3p + 1) + k_1k_2k_3]U_з = k_1k_2k_3U_э. \qquad (14.5)$$

Характеристическое уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению системы, состоящей из трех инерционных звеньев первого порядка, включенных последовательно, может быть также найдено как произведение их операторов и представлено в виде*

$$(T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_3p + 1) + k_1k_2k_3 = 0,$$

или, раскрывая скобки, получаем

$$T_1T_2T_3p^3 + (T_1T_2 + T_2T_3 + T_3T_1)p^2 + (T_1 + T_2 + T_3)p + k_1k_2k_3 + 1 = 0. \qquad (14.6)$$

Вводя далее обозначения

$$a_0 = T_1T_2T_3;$$
$$a_1 = T_1T_2 + T_2T_3 + T_3T_1;$$
$$a_2 = T_1 + T_2 + T_3;$$
$$a_3 = k_1k_2k_3 + 1 = k_{1-3} + 1,$$

получаем характеристическое уравнение в виде

$$a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0. \qquad (14.7)$$

Зная постоянные времени и коэффициенты усиления звеньев системы, определяем коэффициенты характеристического уравнения

$$a_0 = T_1T_2T_3 = 0{,}5 \cdot 0{,}76 \cdot 9{,}9 = 3{,}76;$$
$$a_1 = T_1T_2 + T_2T_3 + T_3T_1 = 0{,}5 \cdot 0{,}76 + 0{,}76 \cdot 9{,}9 + 9{,}9 \cdot 0{,}5 = 12{,}83;$$
$$a_2 = T_1 + T_2 + T_3 = 0{,}5 + 0{,}76 + 9{,}9 = 11{,}16;$$
$$a_3 = k_1k_2k_3 + 1 = 0{,}35 \cdot 1{,}13 \cdot 25 + 1 = 11.$$

Тогда уравнение (14.7) принимает вид

$$3{,}76p^3 + 12{,}83p^2 + 11{,}16p + 11 = 0.$$

Далее проверим устойчивость системы регулирования, пользуясь критерием Рауса — Гурвица.

Первое условие

$$a_0 = 3{,}76 > 0; \; a_1 = 12{,}83 > 0; \; a_2 = 11{,}16 > 0; \; a_3 = 11 > 0.$$

Второе условие

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 a_3 \\ a_0 a_2 \end{vmatrix} = a_1a_2 - a_0a_3 = 12{,}83 \cdot 11{,}16 - 3{,}76 \cdot 11 = 101{,}5 > 0.$$

Следовательно, система регулирования устойчива.

КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ И. А. ВЫШНЕГРАДСКОГО

В 1876 г. профессор И. А. Вышнеградский предложил критерий устойчивости для систем автоматического регулирования, описываемых линейным дифференциальным уравнением третьего порядка. Критерий Вышнеградского и его графическая иллюстрация позволяют,

* Правую часть уравнения (14.5) приравниваем нулю на том основании, что нас интересует не качество регулирования (амплитуда отклонения, период, время затухания и т. д.), а лишь характер корней характеристического уравнения — положительные они или отрицательные.

не решая дифференциального уравнения, судить об устойчивости системы регулирования и о характере ее переходного режима.

Вышнеградский обосновывает свое правило (критерий) путем:

а) рассмотрения неравенств, составленных из коэффициентов характеристического уравнения, предварительно приведенного к виду, в котором коэффициент при старшей производной равен единице;

б) перехода к новой переменной характеристического уравнения и к новым его коэффициентам, из которых только два (из четырех) отличны от единицы;

в) сопоставления аналогичных неравенств, составленных из старых и новых коэффициентов, и построения кривой, полученной как предельное значение этих неравенств.

Найденная кривая — равносторонняя гипербола — в координатах новых коэффициентов разграничивает плоскость первого квадранта прямоугольной системы координат на области устойчивости и неустойчивости.

Несколько проще можно вывести критерий Вышнеградского, пользуясь критерием Рауса — Гурвица или же критерием Михайлова.

Рассмотрим характеристическое уравнение третьего порядка с положительными коэффициентами:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 \tag{14.8}$$

и преобразуем его таким образом, чтобы коэффициент при старшей производной соответствующего дифференциального уравнения был равен единице. Для этого разделим его на коэффициент a_0, получая при этом

$$p^3 + \frac{a_1}{a_0} p^2 + \frac{a_2}{a_0} p + \frac{a_3}{a_0} = 0,$$

или

$$p^3 + C_1 p^2 + C_2 p + C_3 = 0, \tag{14.9}$$

где

$$C_1 = \frac{a_1}{a_0}; \quad C_2 = \frac{a_2}{a_0}; \quad C_3 = \frac{a_3}{a_0}.$$

Уравнение (14.9) путем деления на $C_3 > 0$ и введения новой переменной

$$\varphi = \frac{p}{\sqrt[3]{C_3}},$$

отличающейся от p лишь положительным множителем, приведем к так называемому нормированному виду, т. е. к виду

$$\varphi^3 \frac{1}{C_3} (\sqrt[3]{C_3})^3 + \varphi^2 \frac{C_1}{C_3} (\sqrt[3]{C_3})^2 + \varphi \frac{C_2}{C_3} \sqrt[3]{C_3} + 1 = 0,$$

или

$$\varphi^3 + \frac{C_1}{\sqrt[3]{C_3}} \varphi^2 + \frac{C_2}{\sqrt[3]{C_3^2}} \varphi + 1 = 0,$$

или

$$\varphi^3 + A\varphi^2 + B\varphi + 1 = 0, \tag{14.10}$$

где безразмерные коэффициенты

$$A = \frac{C_1}{\sqrt[3]{C_3}}, \quad B = \frac{C_2}{\sqrt[3]{C_3^2}} \tag{14.11}$$

носят название параметров Вышнеградского.

В соответствии с критерием Рауса — Гурвица все корни уравнения (14.10) расположены слева от оси мнимых величин плоскости корней, следовательно, система регулирования устойчива, если коэффициенты A и B этого уравнения положительны, т. е. $A > 0$, $B > 0$, и если определитель порядка

$$\Delta_{n-1} = \Delta_2 = \begin{vmatrix} A & 1 \\ 1 & B \end{vmatrix} = AB - 1 > 0.$$

Таким образом, устойчивость системы кроме положительности коэффициентов характеризуется еще неравенством

$$AB - 1 > 0,$$

или

$$AB > 1. \tag{14.12}$$

Неустойчивость системы характеризуется неравенством

$$AB - 1 < 0$$

или

$$AB < 1. \tag{14.13}$$

Граничные условия, характеризующие незатухающие гармонические колебания, должны определяться предельным значением этих неравенств, т. е. выражением

$$AB - 1 = 0,$$

или

$$AB = 1. \tag{14.14}$$

Уравнение (14.14) представляет собой в осях прямоугольной системы координат A и B равностороннюю гиперболу (рис. 14-3), которая делит плоскость $A - B$ на области устойчивости и неустойчивости системы автоматического регулирования. Выше кривой $AB = 1$ расположена область устойчивости $AB > 1$, характеризующая затухающий переходный процесс; ниже этой кривой — область неустойчивости $AB < 1$, характеризующая нарастающие колебания.

Анализируя решение уравнения (14.10), Вышнеградский показал, что область устойчивости $AB > 1$, в свою очередь, может быть разделена на области *I*, *II* и *III*, отличающиеся между собой различным расположением корней p характеристического уравнения в плоскости α, $j\beta$ корней. Кривые, разграничивающие эти области, построены [14-2] по уравнениям

$$A^2B^2 - 4(A^3 + B^3) + 18AB - 27 = 0 \tag{14.15}$$

и $$2A^3 - 9AB + 27 = 0 \text{ (при } A < 3). \qquad (14.16)$$

По уравнению (14.15) построены кривые CE и CF, расположенные симметрично относительно биссектрисы координатного угла . Эти кривые ограничивают область III, в которой все три корня p характеристического уравнения вещественные, отрицательные и разные.

По уравнению (14.16) построена кривая DC, выделяющая область II, в которой один корень вещественный, отрицательный, а два других — комплексные с отрицательной вещественной частью.

В каждой из областей I, II и III показаны примерные переходные процессы $x(t)$ во времени. Область I, где комплексные корни расположены ближе к оси мнимых величин, чем вещественный корень, характеризует колебательный характер переходного процесса $x(t)$, в котором отклонение регулируемой величины от установившегося значения меняет свой знак по крайней мере два раза в течение переходного периода. Область II, где хотя и имеются комплексные корни, но они расположены дальше от оси мнимых величин, чем вещественный корень, характеризует монотонный характер переходного процесса, в котором ни величина отклонения, ни ее производная не меняют знака за время затухания переходного процесса. Область III, в которой имеются только вещественные корни, характеризует промежуточные виды переходного процесса; здесь может быть либо процесс без перерегулирования, когда величина отклонения не меняет знака, но может менять знак ее производная, либо процесс с перерегулированием, когда величина отклонения меняет знак один раз.

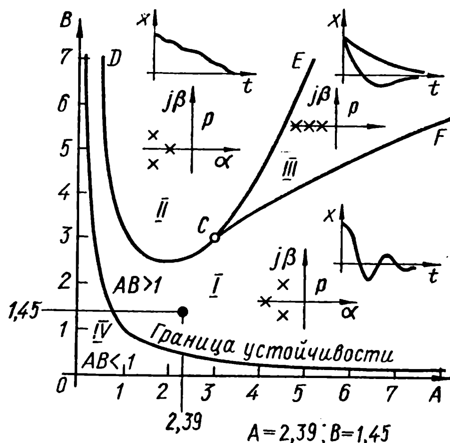


Рис. 14-3. Диаграмма И. А. Вышнеградского.

Из рассмотрения диаграммы Вышнеградского следует, между прочим, что уже в системах третьего порядка при наличии комплексных корней переходный процесс может оказаться не колебательным, а монотонным, и наоборот, при всех вещественных корнях переходный процесс может оказаться не монотонным, а дать переход через нуль. Другими словами, диаграмма Вышнеградского указывает на необходимость отказаться от привычных представлений о прямой связи между вещественностью всех корней и монотонностью переходного процесса, а также от представлений о прямой связи между наличием комплексных корней и колебательностью процесса.

Итак, критерий Вышнеградского позволяет найти ответ на вопрос, устойчива или неустойчива данная система регулирования, описанная дифференциальным уравнением третьего порядка, не решая

этого уравнения. Для этого необходимо иметь характеристическое уравнение (14.8), преобразовать его к виду (14.9) и по формулам (14.11) вычислить коэффициенты A и B. Если при этом неравенство (14.12) удовлетворяется, т. е. если система регулирования устойчива, то по значениям коэффициентов A и B можно посмотреть, какой точке на диаграмме Вышнеградского (рис. 14-3) это соответствует, и по ней установить, какую форму имеет переходный процесс в рассматриваемом случае.

Пример 2. *Дано:* характеристическое уравнение третьего порядка [14-3] в виде

$$a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0,$$

где $a_0 = 3{,}76$; $a_1 = 12{,}83$; $a_2 = 11{,}16$; $a_3 = 11$.

Требуется: пользуясь критерием И. А. Вышнеградского, определить условия устойчивости соответствующей системы автоматического регулирования, и если система устойчива, то установить характер переходного процесса.

Решение. Преобразуем характеристическое уравнение к виду (14.9) путем деления его на коэффициент a_0 при старшей производной. При этом получим

$$p^3 + \frac{a_1}{a_0}p^2 + \frac{a_2}{a_0}p + \frac{a_3}{a_0} = 0,$$

или

$$p^3 + \frac{12{,}83}{3{,}76}p^2 + \frac{11{,}16}{3{,}76}p + \frac{11}{3{,}76} = 0,$$

или

$$p^3 + 3{,}41p^2 + 2{,}97p + 2{,}93 = 0,$$

или

$$C_0p^3 + C_1p^2 + C_2p + C_3 = 0,$$

где коэффициенты

$$C_0 = 1;\ C_1 = 3{,}41;\ C_2 = 2{,}97;\ C_3 = 2{,}93.$$

Тогда по (14.11) коэффициенты A и B будут:

$$A = \frac{C_1}{\sqrt[3]{C_3}} = \frac{3{,}41}{\sqrt[3]{2{,}93}} = 2{,}39;$$

$$B = \frac{C_2}{\sqrt[3]{C_3^2}} = \frac{2{,}97}{\sqrt[3]{2{,}93^2}} = 1{,}45.$$

Произведение коэффициентов получается

$$AB = 2{,}39 \cdot 1{,}45 = 3{,}47 > 1,$$

следовательно, исследуемая система регулирования является устойчивой.

Установим форму переходного процесса. Для этого откладываем на диаграмме (рис. 14-3) координаты A и B и находим на плоскости точку, которая оказывается в области I устойчивости. Этой области соответствует характеристическое уравнение, содержащее два комплексных корня и один корень чисто вещественный. Комплексные корни здесь расположены ближе к оси мнимых величин, чем вещественный, поэтому рассматриваемый переходный процесс $x(t)$ имеет колебательный характер с числом переходов регулируемой величины через нуль не менее двух.

КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ А. В. МИХАЙЛОВА

Характеристическое уравнение (14.1), характеризующее замкнутую систему регулирования, можно представить в виде полинома

$$f(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + a_2p^{n-2} + \cdots + a_{n-1}p + a_n. \qquad (14.17)$$

Если применительно к гармоническим колебаниям подставить в уравнение (14.17) $p = j\omega$ и отделить вещественные величины от мнимых, то многочлен (14.17) может быть записан в виде

$$f(j\omega) = g(\omega) + jh(\omega), \tag{14.18}$$

где функция $f(j\omega)$ представляет собой характеристический вектор, модуль и аргумент которого зависят от частоты ω.

В 1938 г. советский ученый А. В. Михайлов доказал, что система регулирования будет устойчивой, если при изменении ω от 0 до $+\infty$ вектор $f(j\omega)$ повернется в положительном направлении на угол, равный $n\frac{\pi}{2}$, или, что то же самое, если характеристическая кривая,

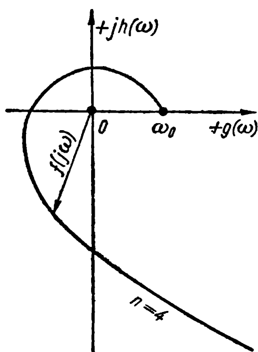


Рис. 14-4. Характеристическая кривая (годограф) критерия А. В. Михайлова для устойчивой системы регулирования при степени характеристического уравнения $n = 4$.

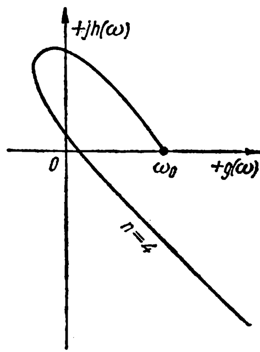


Рис. 14-5. Характеристическая кривая (годограф) критерия А. В. Михайлова для неустойчивой системы регулирования при степени характеристического уравнения $n = 4$.

описанная концом вектора $f(j\omega)$, с ростом ω обходит последовательно в положительном направлении (без пропусков) n квадрантов, где n — степень характеристического уравнения

$$a_0p^n + a_1p^{n-1} + a_2p^{n-2} + \cdots + a_{n-1}p + a_n = 0.$$

Зная, таким образом, коэффициенты характеристического уравнения, определяемые постоянными времени затухания и коэффициентами усиления звеньев системы, можно с изменением ω получить характеристическую кривую, описываемую характеристическим вектором (14.18), и по ней судить об устойчивости системы регулирования.

На рис. 14-4 показана характеристическая кривая критерия А. В. Михайлова для устойчивой системы регулирования при степени характеристического уравнения $n = 4$. Характеристическая кривая обходит последовательно (без пропусков) все четыре квадранта комплексной плоскости.

На рис. 14-5 приведена характеристическая кривая критерия А. В. Михайлова для неустойчивой системы регулирования также при степени характеристического уравнения $n = 4$. Здесь характеристическая кривая при своем обходе пропускает один из квадрантов (третий) комплексной плоскости.

Пример 2. *Дано:* 1. Система регулирования напряжения, представленная на рис. 14-1. Все данные, характеризующие эту систему, и параметры ее звеньев те же, что и в примере 1.

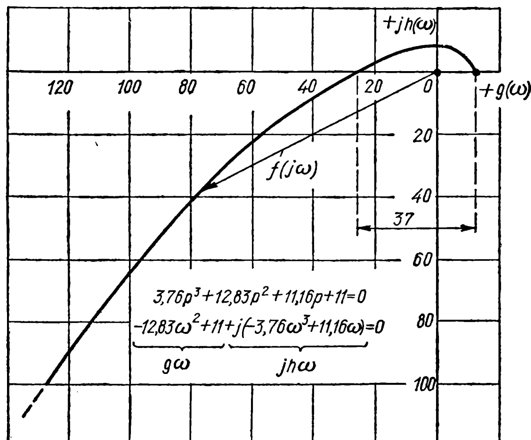


Рис. 14-6. Характеристическая кривая вектора $f(j\omega)$ критерия А. В. Михайлова для системы регулирования напряжения (рис. 14-1 и 14-2).

2. Характеристическое уравнение, описывающее заданную систему регулирования, было получено в примере 1 и имеет вид (14.7)

$$a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0,$$

где $a_0 = 3{,}76$; $a_1 = 12{,}83$; $a_2 = 11{,}16$; $a_3 = 11$.

Требуется: проверить устойчивость данной системы регулирования, пользуясь критерием устойчивости А. В. Михайлова.

Решение. Характеристическое уравнение (14.7) выразим в виде полинома (14.17)

$$f(p) = a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3.$$

Подставив в это выражение $p = j\omega$, получим выражение

$$f(j\omega) = -a_0j\omega^3 - a_1\omega^2 + a_2j\omega + a_3,$$

которое после отделения вещественных величин от мнимых примет вид

$$f(j\omega) = -a_1\omega^2 + a_3 + j(-a_0\omega^3 + a_2\omega). \qquad (14.19)$$

Подставляя значения коэффициентов характеристического уравнения в выражение (14.19), получаем

$$f(j\omega) = -12{,}83\omega^2 + 11 + j(-3{,}76\omega^3 + 11{,}16\omega).$$

Задаваясь теперь положительными значениями ω, начиная от нуля, получаем данные для построения характеристической кривой вектора $f(j\omega)$.

Результаты подсчета соответствующих координат приведены в табл. 3. По данным этой таблицы на рис. 14-6 построена соответствующая характеристическая кривая, показывающая, что исследуемая система регулирования устойчива, так как количество квадрантов, по которым последовательно (без пропусков) проходит эта кривая, равно степени характеристического уравнения.

Таблица 3

ω	$g(\omega)$			$jh\omega$			$g(\omega + jh\omega)$
	$-12{,}83\omega^2$		11	$-3{,}76\omega^3$		$11{,}16\omega$	
	ω^2	$-12{,}83\times\omega^2$		ω^3	$-3{,}76\times\omega^3$		
0	0	0	11	0	0	0	+11
0,5	0,25	—3,2	11	0,125	—0,47	5,5	+7,8+j5,0
0,8	0,64	—8,2	11	0,51	—1,93	8,85	+2,8+j6,9
1,0	1,0	—12,83	11	1,0	—3,76	11,16	—1,83+j7,4
1,2	1,44	—18,5	11	1,73	—6,5	14,0	—7,5+j7,5
1,5	2,25	—29	11	3,38	—12,7	16,7	—18+j4,0
2,0	4,0	—51,4	11	8,0	—30	22,3	—40,4—j7,7
3,0	9,0	—115	11	27,0	—101,5	33,5	—104—j68
3,25	10,5	—135,5	11	34,4	—129	3,6	—124—j93
4,0	16,0	—205	11	64,0	—240	44,2	—194—j196

Заметим, что в рассматриваемом случае критическое значение коэффициента усиления системы регулирования, определяемое как ближайшее расстояние между точками кривой, лежащими на оси вещественных чисел, равно 37 (рис. 14-6).

КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАЙКВИСТА — МИХАЙЛОВА

Рассмотренные ранее критерии устойчивости Рауса — Гурвица и А. В. Михайлова применимы тогда, когда известно дифференциальное уравнение замкнутой системы регулирования, соответствующее ему характеристическое уравнение, коэффициенты a_0, a_1, a_2, . . . , a_n которого правильно отражают параметры всех звеньев рассматриваемой системы.

Однако бывают случаи, когда для тех или иных звеньев данной системы регулирования трудно составить достаточно достоверные дифференциальные уравнения и когда, следовательно, не представляется возможным использовать эти критерии. В этих случаях приходит на помощь так называемый амплитудно-фазовый частотный критерий устойчивости системы регулирования, не требующий составления дифференциальных уравнений звеньев и использующий экспериментально снятые частотные характеристики этих звеньев. Этот метод применим, конечно, и во всех тех случаях, когда могут быть применены методы Рауса — Гурвица или А. В. Михайлова, т. е. когда дифференциальные уравнения звеньев системы известны.

Амплитудно-фазовый частотный критерий позволяет судить об устойчивости замкнутой системы регулирования в переходном режиме, т. е. в динамике, по ее свойствам в установившемся режиме вынужденных колебаний в разомкнутом состоянии.

Впервые частотный метод исследования устойчивости был разработан Найквистом в 1932 г. применительно к устойчивости работы

усилителей с отрицательной обратной связью. В 1936 г. советский ученый А. В. Михайлов показал и математически доказал применимость этого метода для анализа устойчивости любых замкнутых систем автоматического регулирования путем исследования их свойств в разомкнутом (фактически или мысленно) состоянии.

Рассмотрим сущность частотного критерия устойчивости Найквиста — Михайлова и его краткое обоснование.

Пусть разомкнутая система регулирования описывается дифференциальным уравнением

$$C(p)\,\beta_{\text{вых}} = D(p)\,\beta_{\text{вх}}, \qquad (14.20)$$

где $C(p)$ и $D(p)$ — полиномы от p.

В реальных условиях степень полинома $C(p)$ выше степени полинома $D(p)$ или, в крайнем случае, равна ей.

Характеристическое уравнение рассматриваемой разомкнутой системы

$$C(p) = 0. \qquad (14.21)$$

Пусть при этом разомкнутая система будет устойчивой, т. е. характеристическое уравнение (14.21) не содержит корней с положительными вещественными частями.

Принимая во внимание, что в замкнутой системе регулирования на входе и выходе регулятора должна учитываться обратимость знака, т. е. $\beta_{\text{вых}} = -\beta_{\text{вх}} = \beta$, дифференциальное уравнение системы в замкнутом состоянии с учетом уравнения (14.20) будет иметь вид

$$C(p)\,\beta_{\text{вых}} - D(p)\,\beta_{\text{вх}} = [C(p) + D(p)]\,\beta = 0, \qquad (14.22)$$

а его характеристическое уравнение

$$C(p) + D(p) = 0. \qquad (14.23)$$

Разделив уравнение (14.23) на (14.21), получим

$$\frac{C(p) + D(p)}{C(p)} = 1 + \frac{D(p)}{C(p)}, \qquad (14.24)$$

где, как было указано, степень полинома $C(p)$ выше степени полинома $D(p)$.

Пусть в некотором конкретном случае степень полинома $C(p)$ на единицу больше степени полинома $D(p)$, т. е.

$$C(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + a_2p^{n-2} + \cdots + a_{n-1}p + a_n$$

и

$$D(p) = b_0p^{n-1} + b_1p^{n-2} + b_2p^{n-3} + \cdots + b_{n-2}p + b_{n-1}.$$

Тогда равенство (14.24) принимает вид

$$1 + \frac{D(p)}{C(p)} = \frac{a_0p^n + a_1p^{n-1} + \cdots + a_{n-1}p + a_n + b_0p^{n-1} + b_1p^{n-2} + \cdots + b_{n-2}p + b_{n-1}}{a_0p^n + a_1p^{n-1} + \cdots + a_{n-1}p + a_n},$$

или, вводя обозначения

$$C_0 = a_0;$$
$$C_1 = a_1 + b_0;$$
$$C_2 = a_2 + b_1;$$
$$\ldots\ldots\ldots$$
$$C_{n-1} = a_{n-1} + b_{n-2};$$
$$C_n = a_n + b_{n-1},$$

получаем

$$1 + \frac{D(p)}{C(p)} = \frac{C_0 p^n + C_1 p^{n-1} + C_2 p^{n-2} + \cdots + C_{n-1} p + C_n}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \cdots + a_{n-1} p + a_n}. \qquad (14.25)$$

Из этого выражения видим, что полином числителя, характеризующий замкнутую систему регулирования, имеет столько же корней, сколько и полином знаменателя, характеризующий систему в разомкнутом состоянии.

Пусть в числителе выражения (14.25) будут корни p_1, p_2, p_3, ..., p_n, а в знаменателе — корни p'_1, p'_2, p'_3, ..., p'_n. Тогда, разлагая полиномы числителя и знаменателя по правилам высшей алгебры на множители, получаем выражение (14.25) в виде

$$1 + \frac{D(p)}{C(p)} = \frac{C_0 (p - p_1)(p - p_2) \cdots (p - p_n)}{a_0 (p - p'_1)(p - p'_2) \cdots (p - p'_n)},$$

или, приняв старшие коэффициенты $C_0 = 1$ и $a_0 = 1$, получим

$$1 + \frac{D(p)}{C(p)} = \frac{(p - p_1)(p - p_2) \cdots (p - p_n)}{(p - p'_1)(p - p'_2) \cdots (p - p'_n)}. \qquad (14.26)$$

Выбирая значение p в какой-либо точке на оси мнимых величин комплексной плоскости, т. е. соответственно подставив $p = j\omega$, получаем

$$1 + \frac{D(j\omega)}{C(j\omega)} = \frac{(j\omega - p_1)(j\omega - p_2) \cdots (j\omega - p_n)}{(j\omega - p'_1)(j\omega - p'_2) \cdots (j\omega - p'_n)},$$

или, вводя обозначения

$$K(j\omega) = \frac{D(j\omega)}{C(j\omega)}$$

и

$$W(j\omega) = 1 + K(j\omega),$$

находим

$$W(j\omega) = 1 + K(j\omega) = \frac{(j\omega - p_1)(j\omega - p_2) \cdots (j\omega - p_n)}{(j\omega - p'_1)(j\omega - p'_2) \cdots (j\omega - p'_n)}. \qquad (14.27)$$

Каждый из множителей в числителе и знаменателе правой части выражения (14.27) может быть представлен в виде разности векторов $(j\omega - p_i)$ и $(j\omega - p'_i)$ соответственно (рис. 14-7). Так как в общем случае корни характеристического уравнения могут быть как отрицательными, так и положительными, то и векторы $(j\omega - p_i)$ и $(j\omega - p'_i)$ также могут быть расположены не только в отрицательной (слева от оси) полуплоскости, но и в положительной.

С другой стороны, известно, что система регулирования будет устойчивой, если все вещественные корни и действительные части сопряженно-комплексных корней будут отрицательны, т. е. когда все корни будут расположены в левой части комплексной плоскости. Поэтому, если рассматриваемая замкнутая система регулирования устойчива, то все векторы-множители в числителе уравнения (14.27) будут располагаться в отрицательной полуплоскости (рис. 14-7). Если, как это было принято в исходных условиях, рассматриваемая система в разомкнутом состоянии также будет устойчива, то и все векторы-множители в знаменателе уравнения (14.27) будут располагаться в отрицательной полуплоскости.

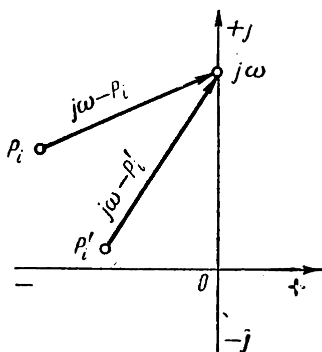


Рис. 14-7. Векторы-множители уравнения (14.27) на комплексной плоскости при устойчивой системе регулирования.

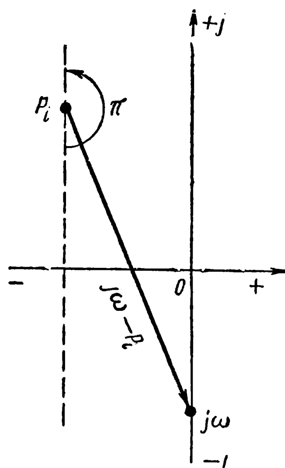


Рис. 14-8. График изменения вектора $(j\omega - p_i)$ с изменением ω от $-\infty$ до $+\infty$.

На рис. 14-8 показан вектор-множитель $(j\omega - p_i)$, соответствующий замкнутой системе регулирования. При изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ этот вектор повернется в положительном направлении на пол-оборота, т. е. на угол π. Но так как в числителе выражения (14.27) этих векторов-множителей будет не один, а n, то при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ они повернутся в положительном направлении на суммарный угол $n\pi$, а при изменении ω от 0 до $+\infty$ — на угол $n\frac{\pi}{2}$. Аналогично все n векторов-множителей в знаменателе выражения (14.27) при изменении ω от 0 до $+\infty$ повернутся в положительном направлении на угол $n\frac{\pi}{2}$.

Выражение $W(j\omega) = 1 + K(j\omega)$ по равенству (14.27) представляет собой вектор, получаемый от деления вектора числителя правой части выражения на вектор знаменателя. Модуль этого вектора равен делению модуля вектора числителя на модуль вектора знаменателя, а аргумент равен разности аргументов этих векторов. Сле-

довательно, при изменении ω от 0 до $+\infty$ вектор $W(j\omega)$ повернется на суммарный угол

$$n\frac{\pi}{2}-n\frac{\pi}{2}=0. \qquad (14.28)$$

Одним из двух членов функции $W(j\omega)$ в выражении (14.27) является функция $K(j\omega)$, называемая амплитудно-фазовой характеристикой разомкнутой системы регулирования. Согласно принятому обозначению, эта функция равна отношению полинома $D(p)$ к полиному $C(p)$. После подстановки $p=j\omega$ функция $K(j\omega)$ может быть представлена в виде

$$K(j\omega)=\frac{D(j\omega)}{C(j\omega)}=\frac{b_0(j\omega)^{n-1}+b_1(j\omega)^{n-2}+\cdots+b_{n-2}(j\omega)+b_{n-1}}{a_0(j\omega)^n+a_1(j\omega)^{n-1}+\cdots+a_{n-1}(j\omega)+a_n}, \qquad (14.29)$$

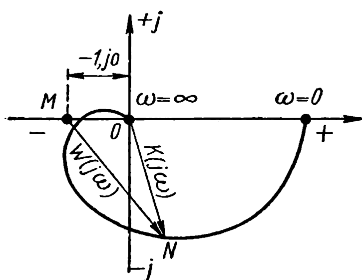


Рис. 14-9. Характеристическая кривая при устойчивой системе регулирования.

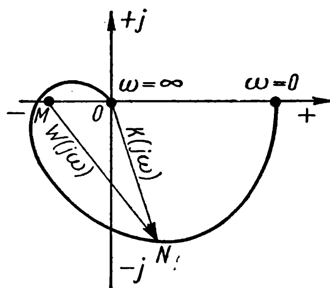


Рис. 14-10. Характеристическая кривая при неустойчивой системе регулирования.

или, разделив все члены числителя и знаменателя на $(j\omega)^n$, получим

$$K(j\omega)=\frac{b_0\frac{1}{(j\omega)}+b_1\frac{1}{(j\omega)^2}+\cdots+b_{n-2}\frac{1}{(j\omega)^{n-1}}+b_{n-1}\frac{1}{(j\omega)^n}}{a_0+a_1\frac{1}{(j\omega)}+a_2\frac{1}{(j\omega)^2}+\cdots+a_{n-1}\frac{1}{(j\omega)^{n-1}}+a_n\frac{1}{(j\omega)^n}}. \qquad (14.30)$$

Одно крайнее значение рассматриваемой амплитудно-фазовой характеристики найдем по равенству (14.29) при угловой частоте $\omega=0$:

$$K(j\omega)=\frac{b_{n-1}}{a_n}.$$

Это будет действительная величина, расположенная на положительной оси комплексной плоскости.

Другое крайнее значение этой характеристики найдем по равенству (14.30) при $\omega=\infty$:

$$K(j\omega)=0.$$

Это будет точка в начале координат комплексной плоскости.

Если вычислить значение $K(j\omega)$ при других значениях ω, т. е. при $0<\omega<+\infty$, то построенная по найденным точкам амплитуд-

но-фазовая характеристика разомкнутой системы регулирования изобразится кривой, показанной на рис. 14-9. Из этой характеристики видно, что началом вектора $K(j\omega)$ является точка 0, т. е. начало координат. Начало же вектора $W(j\omega) = 1 + K(j\omega)$ найдем, приняв угловую частоту $\omega = 0$, при которой вектор $K(j\omega) = \frac{b_{n-1}}{a_n}$ и, следовательно, расположен на оси действительных положительных значений. При этом легко установить, что начало вектора $W(j\omega)$ должно находиться в точке M, координаты которой $(-1, j0)$, а конец его совпадает с концом вектора $K(j\omega)$. При любом другом значении угловой частоты ω конец вектора $W(j\omega)$ также будет совпадать с концом вектора $K(j\omega)$ и при изменении угловой частоты от $\omega = 0$ до $\omega = +\infty$ он опишет ту же кривую, что и вектор $K(j\omega)$.

При этом могут быть два случая:

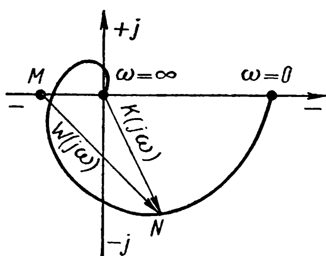


Рис. 14-11. Амплитудно-фазовая характеристика для устойчивой системы четвертого порядка.

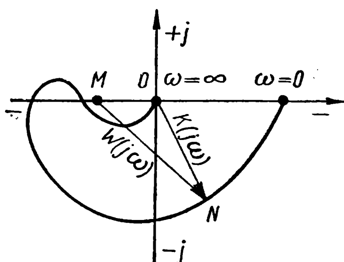


Рис. 14-12. Разновидность амплитудно-фазовой характеристики для устойчивой системы регулирования.

1) с изменением частоты от $\omega = 0$ до $\omega = +\infty$ кривая, описанная концом вектора $W(j\omega)$, не охватывает точки M с координатами $(-1, j0)$, что может быть тогда, когда вектор $W(j\omega)$ поворачивается в конечном счете на угол, равный нулю (рис. 14-9);

2) кривая охватывает точку M с координатами $(-1, j0)$, что может быть тогда, когда вектор $W(j\omega)$ поворачивается на угол, больший нуля (рис. 14-10), точнее — на угол 360°.

Учитывая условие (14.28), легко заключить, что в первом случае система регулирования в замкнутом состоянии будет устойчивой, а во втором — неустойчивой (в первом случае все корни характеристического уравнения замкнутой системы находятся в левой комплексной полуплоскости, а во втором случае часть их должна быть в правой полуплоскости, поэтому условие (14.28) удовлетворяться не может).

Исходя из изложенного, можно сформулировать условия устойчивости замкнутой системы регулирования — критерия устойчивости Найквиста — Михайлова — в следующем виде: если степень полинома $C(p)$ в равенстве (14.20) выше степени полинома $D(p)$ и соответствующая разомкнутая система регулирования устойчива, то для устойчивости системы в замкнутом состоянии необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика, описанная концом вектора

$K(j\omega)$ при изменении угловой частоты от $\omega = 0$ до $\omega = +\infty$, не охватывала точки M с координатами $(-1, j0)$ на комплексной плоскости*.

Этому критерию удовлетворяют системы, амплитудно-фазовые характеристики которых показаны на рис. 14-9, 14-11 и 14-12, и не удовлетворяют системы, характеристики которых приведены на рис. 14-10 и 14-13.

Условие устойчивости разомкнутой системы в общем случае можно определить по знакам корней полинома $C(p)$. При этом система будет устойчивой, если характеристическое уравнение (14.21) не содержит корней с положительной вещественной частью.

Для часто встречающихся одноконтурных систем условие устойчивости в разомкнутом состоянии видно сразу из уравнений звеньев. Если для некоторых звеньев их характеристика снимается экспериментально, то устойчивость этих звеньев видна из опыта.

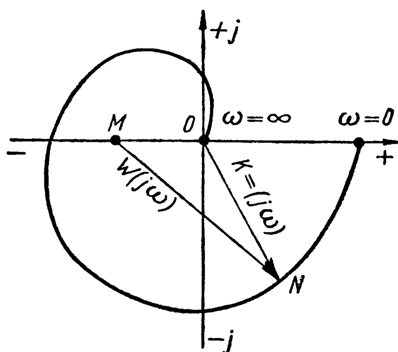


Рис. 14-13. Амплитудно-фазовая характеристика при неустойчивой системе регулирования четвертого порядка.

ПОСТРОЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Разделив уравнение (14.20) на полином $C(p)$, получаем уравнение разомкнутой системы регулирования в виде

$$\beta_{вых} = \frac{D(p)}{C(p)} \beta_{вх}, \qquad (14.31)$$

где отношение

$$\frac{D(p)}{C(p)} = K(p) \qquad (14.32)$$

представляет собой комплексный коэффициент усиления разомкнутой системы регулирования, который при подстановке $p = j\omega$ принимает вид

$$K(j\omega) = \frac{D(j\omega)}{C(j\omega)}. \qquad (14.33)$$

Из сравнения выражений (14.29) и (14.33) видно, что комплексный коэффициент усиления (14.33) представляет собой вектор $K(j\omega)$, который при изменении угловой частоты ω описывает амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы регулирования.

Отделив в правой части выражения (14.33) действительную часть комплекса от мнимой, получим

$$K(j\omega) = g(\omega) \pm jh(\omega). \qquad (14.34)$$

Подставляя в равенство (14.34) различные значения угловой частоты от $\omega = 0$ до $\omega = +\infty$, получаем координаты точек, лежащих

* Возможно и другое определение критерия устойчивости Найквиста — Михайлова [14-4].

на искомой амплитудно-фазовой характеристике разомкнутой системы регулирования.

По расположению этой характеристики по отношению к точке на комплексной плоскости с координатами (—1, $j0$) можно будет судить об устойчивости системы регулирования в замкнутом состоянии, пользуясь критерием Найквиста — Михайлова.

Пример 4. *Дано:* 1. Одноконтурная система регулирования напряжения, представленная в разомкнутом состоянии на рис. 14-14. Она состоит из трех инерционных звеньев первого порядка, описываемых следующими дифференциальными уравнениями в операторной форме:

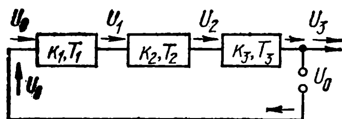


Рис. 14-14. Структурная схема одноконтурной разомкнутой системы регулирования напряжения.

звено регулятора

$$(T_1p + 1)\,U_1 = k_1U_0;$$

звено возбудителя

$$(T_2p + 1)\,U_2 = k_2U_1;$$

звено генератора

$$(T_3p + 1)\,U_3 = k_3U_2.$$

Так как система рассматривается в разомкнутом состоянии, то знак минус в правой части уравнения звена регулятора опущен.

2. Постоянные времени звеньев

$$T_1 = 0{,}5\ \text{с};\ T_2 = 0{,}76\ \text{с};\ T_3 = 9{,}9\ \text{с}.$$

3. Коэффициенты усиления звеньев:

$$k_1 = 0{,}35;\ k_2 = 1{,}13;\ k_3 = 25.$$

Требуется: проверить устойчивость замкнутой системы регулирования с помощью частотного критерия Найквиста—Михайлова.

Решение. Перемножая правые и левые части уравнений звеньев, получаем дифференциальное уравнение системы в виде

$$(T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_3p + 1)\,U_3 = k_1k_2k_3U_0,$$

или, обозначая $k_1k_2k_3 = k_{1-3}$, после перемножения в левой части приводим его к выражению (14.20), получая при этом

$$[(T_1T_2T_3)p^3 + (T_1T_2 + T_2T_3 + T_3T_1)\,p^2 + (T_1 + T_2 + T_3)\,p + 1]\,U_3 = k_{1-3}U_0,$$

где

$$U_3 = \beta_{\text{вых}};$$

$$U_0 = \beta_{\text{вх}};$$

$$(T_1T_2T_3)\,p^3 + (T_1T_2 + T_2T_3 + T_3T_1)\,p^2 + (T_1 + T_2 + T_3)\,p + 1 = C(p);$$

$$k_{1-3} = D(p).$$

Далее из этого выражения по аналогии с равенством (14.31) получаем

$$U_3 = \frac{k_{1-3}}{(T_1T_2T_3)\,p^3 + (T_1T_2 + T_2T_3 + T_3T_1)\,p^2 + (T_1 + T_2 + T_3)\,p + 1}\,U_0,$$

где коэффициент при U_0 представляет собой в соответствии с выражениями (14.31) и (14.32) комплексный коэффициент усиления $K(p)$, который после подстановки $p = j\omega$ принимает по аналогии с равенством (14.33) вид

$$K(j\omega) = \frac{k_{1-3}}{(T_1T_2T_3)(j\omega)^3 + (T_1T_2 + T_2T_3 + T_3T_1)(j\omega)^2 + (T_1 + T_2 + T_3)(j\omega) + 1}.$$

Определим в этом равенстве значения параметров, не зависящих от частоты ω:

$$k_{1-3} = k_1 k_2 k_3 = 0{,}35 \cdot 1{,}13 \cdot 25 = 9{,}9;$$

$$T_1 T_2 T_3 = 0{,}5 \cdot 0{,}76 \cdot 9{,}9 = 3{,}76;$$

$$T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_3 T_1 = 0{,}5 \cdot 0{,}76 + 0{,}76 \cdot 9{,}9 + 9{,}9 \cdot 0{,}5 = 12{,}85;$$

$$T_1 + T_2 + T_3 = 0{,}5 + 0{,}76 + 9{,}9 = 11{,}16.$$

Тогда

$$K(j\omega) = \frac{9{,}9}{3{,}76(j\omega)^3 + 12{,}85(j\omega)^2 + 11{,}16(j\omega) + 1},$$

или

$$K(j\omega) = \frac{9{,}9}{-j3{,}76\omega^3 - 12{,}85\omega^2 + j11{,}16\omega + 1}, \tag{14.35}$$

т. е.

$$K(j\omega) = \frac{9{,}9}{[1 - 12{,}85\omega^2] + j[11{,}16\omega - 3{,}76\omega^3]}.$$

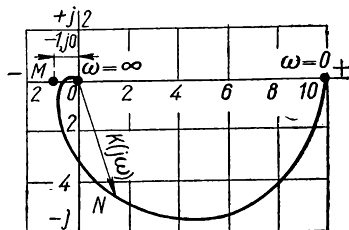


Рис. 14-15. Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы регулирования.

Избавляясь от мнимости в знаменателе (путем умножения числителя и знаменателя на сопряженный комплекс знаменателя), получаем

$$K(j\omega) = 9{,}9\frac{[1 - 12{,}85\omega^2] - j[11{,}16\omega - 3{,}76\omega^3]}{[1 - 12{,}85\omega^2]^2 + [11{,}16\omega - 3{,}76\omega^3]^2},$$

или

$$K(j\omega) = 9{,}9\frac{1 - 12{,}85\omega^2}{[1 - 12{,}85\omega^2]^2 + [11{,}16\omega - 3{,}76\omega^3]} -$$

$$- j9{,}9\frac{11{,}16\omega - 3{,}76\omega^3}{[1 - 12{,}85\omega^2]^2 + [11{,}16\omega - 3{,}76\omega^3]^2},$$

т. е. уравнение приняло вид комплекса (14.34) с разделенными действительной и мнимой частями.

С изменением в последнем уравнении угловой частоты от $\omega = 0$ до $\omega = +\infty$ вектор $K(j\omega)$ будет изменяться как по величине, так и по фазе, описывая своим концом на комплексной плоскости искомую амплитудно-фазовую характеристику рассматриваемой разомкнутой системы регулирования.

Таблица 4

ω	ω^2	ω^3	$M = 1 - 12{,}85\omega^2$	$N = 11{,}16\omega - 3{,}76\omega^3$	$\frac{M}{M^2+N^2}$	$\frac{N}{M^2+N^2}$	$K(j\omega) = g(\omega) \pm jh(\omega)$: $9{,}9\frac{M}{M^2+N^2}$	$-j9{,}9 \times \frac{N}{M^2+N^2}$
0	0	0	1,0	0	1,0	0	9,90	0
0,05	0,0025	0,000 125	0,968	0,558	0,776	0,447	7,70	$-j4{,}42$
0,1	0,01	0,001	0,871	1,112	0,438	0,558	4,33	$-j5{,}52$
0,2	0,04	0,008	0,486	2,202	0,095	0,433	0,94	$-j4{,}30$
0,5	0,25	0,125	—2,212	5,110	—0,071	0,165	—0,71	$-j1{,}64$
0,75	0,562	0,422	—6,240	6,82	—0,073	0,080	—0,72	$-j0{,}79$
1,0	1,0	1,0	—11,85	7,40	—0,061	0,038	—0,60	$-j0{,}37$
1,5	2,25	3,375	—28,0	4,09	—0,035	0,005	—0,346	$-j0{,}05$
2,5	6,25	15,62	—79,5	—30,7	—0,011	—0,0042	—0,109	$+j0{,}041$
5,0	25,0	125	—321	—414	—0,0012	—0,0015	—0,011	$+j0{,}014$

Координаты точек искомой характеристики вычислены для ряда значений угловой частоты ω и сведены в табл. 4. При этом координаты точки, соответствующей $\omega = \infty$, определены по равенству (14.35).

По данным табл. 4 на рис. 14-15 построена амплитудно-фазовая характеристика рассматриваемой разомкнутой системы. Характеристика не охватывает точки M с координатами (-1, $j0$) комплексной плоскости, следовательно, рассматриваемая система в замкнутом состоянии является устойчивой.

МЕТОД ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для сложных систем автоматического регулирования исследование условий устойчивости путем использования амплитудно-фазовых частотных характеристик требует большой затраты времени.

Проверка условий устойчивости иногда упрощается, если вместо амплитудно-фазовых характеристик пользоваться логарифмическими амплитудно-фазовыми характеристиками, вычерченными в логарифмическом масштабе. Точная логарифмическая характеристика строится в виде кривой по точкам, но для целей исследования условий устойчивости достаточно построить приближенную логарифмическую характеристику, состоящую из отрезков прямых (асимптот к точной характеристике) с кратными углами наклона.

Для уяснения этого метода исследования рассмотрим выражение для амплитудно-фазовой характеристики какого-либо элемента системы

$$K(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = R(\omega)\, e^{j\varphi(\omega)}, \tag{14.36}$$

где $U(\omega)$ — вещественная частотная характеристика;
$V(\omega)$ — мнимая частотная характеристика;
$R(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$ — амплитудная частотная характеристика (модуль комплексного коэффициента затухания);
$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \dfrac{V(\omega)}{U(\omega)}$ — фазовая частотная характеристика (фазовый угол комплексного коэффициента затухания).

При использовании логарифмических частотных характеристик элемента системы затухание характеризуется не величиной модуля $R(\omega)$, а величиной $20 \lg R(\omega)$ и измеряется в децибелах.

Децибел определяется соотношением

1 децибел = 20 lg 10.

Частота ω измеряется в 1/с, а изменение частоты измеряется либо в октавах (при изменении частоты в два раза), либо в декадах (при изменении частоты в 10 раз).

Прологарифмировав выражение (14.36), получим логарифмическую амплитудно-фазовую частотную характеристику

$$20 \lg K(j\omega) = 20 \lg R(\omega) + j\varphi(\omega) \cdot 20 \lg e,$$

или

$$20 \lg K(j\omega) = L(\omega) + j\varphi(\omega) \cdot 20 \lg e, \tag{14.37}$$

где составляющая

$$L(\omega) = 20 \lg R(\omega) \tag{14.38}$$

представляет собой логарифмическую амплитудную характеристику элемента, а составляющая

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\frac{V(\omega)}{U(\omega)} \qquad (14.39)$$

— логарифмическую фазовую характеристику.

Точное значение логарифмической амплитудной характеристики (14.38) получается путем кропотливого ее расчета по точкам при различных значениях частоты ω. Приближенное ее значение получается намного быстрее в виде двух прямых (асимптот), одна из которых $L_1(\omega)$ получается при малых значениях частоты $\left(\omega \ll \frac{1}{T}\right)$, а другая — $L_2(\omega)$ — при больших их значениях $\left(\omega \gg \frac{1}{T}\right)$. Прямые эти сопрягаются при частоте $\omega_c = \frac{1}{T}$, где T — постоянная времени элемента.

Дальнейшее рассмотрение метода проведем на примерах рассмотрения основных звеньев системы регулирования, передаточные функции которых приведены в табл. 5.

Таблица 5

№ п. п	Наименование звена	Передаточная функция	Примечания
1	Дифференцирующее первого порядка	$K(p) = \tau_p + 1$	Звенья 2, 3 и 6 являются устойчивыми, если все члены в знаменателе передаточной функции имеют положительный знак
2	Инерционное (апериодическое)	$K(p) = \frac{1}{Tp \pm 1}$	
3	Интегрирующее	$K(p) = \frac{1}{p}$	
4	Усилительное (безынерционное)	$K(p) = k$	
5	Дифференцирующее второго порядка	$K(p) = \tau^2 p^2 + 2\xi\tau p + 1$	
6	Колебательное	$K(p) = \frac{1}{T^2p^2 \pm 2\xi Tp + 1}$	

1. Дифференцирующее звено первого порядка.

Передаточная функция звена

$$K(p) = \tau p + 1. \qquad (14.40)$$

Амплитудно-фазовая характеристика звена с учетом (14.36)

$$K(j\omega) = j\omega\tau + 1.$$

Модуль комплексного коэффициента затухания

$$R(\omega) = \sqrt{1 + \omega^2\tau^2}.$$

Фазовый угол

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\omega\tau.$$

Тогда по (14.38) логарифмическая амплитудная характеристика звена

$$L(\omega) = 20 \lg R(\omega) = 20 \lg \sqrt{1 + \omega^2\tau^2}. \qquad (14.41)$$

Приближенное значение логарифмической амплитудной характеристики (14.38) найдем следующим путем:

1) при $\omega \ll \frac{1}{\tau}$ можно пренебречь частотой ω и тогда

$$L_1(\omega) = 20 \lg 1 = 0; \qquad (14.42)$$

это будет прямая, совпадающая с осью абсцисс;

2) при $\omega \gg \frac{1}{\tau}$ можно пренебречь единицей и тогда

$$L_2(\omega) = 20 \lg \omega\tau; \qquad (14.43)$$

это будет наклонная прямая, наклон которой определяется ниже.

Следовательно, приближенная логарифмическая амплитудная характеристика звена может быть изображена в виде двух прямолинейных отрезков $L_1(\omega)$ и $L_2(\omega)$, сопрягающихся при частоте $\omega_c = \frac{1}{\tau}$. Первая из этих прямых $L_1(\omega)$ совпадает с осью частот, а вторая $L_2(\omega)$ имеет наклон к ней.

Наклон прямой $L_2(\omega)$ можно определить так:

1) при увеличении частоты в два раза (т. е. на одну октаву) величина $20 \lg \omega\tau$ обращается в $20 \lg 2\omega\tau$, т. е. возрастает на $20 \lg 2 = 20 \cdot 0{,}3 = 6$ дБ. Следовательно, наклон прямой $L_2(\omega)$ равен 6 дБ на октаву;

2) при увеличении частоты в 10 раз (т. е. на одну декаду) величина $20 \lg \omega\tau$ обращается в $20 \lg 10\omega\tau$, т. е. возрастает на $20 \lg 10 = 20 \cdot 1 = 20$ дБ. Следовательно, наклон прямой $L_2(\omega)$ равен 20 дБ на декаду.

Наклон 20 дБ на декаду эквивалентен наклону 6 дБ на октаву.

Для построения логарифмической амплитудной характеристики используется полулогарифмическая сетка, по оси ординат которой откладываются значения логарифма модуля $L(\omega)$ в децибелах, а по оси абсцисс — либо частота ω, если известно значение τ, либо величина $\omega\tau$, если построение проводится в общем виде, пригодном для любых значений τ.

На рис. 14-16 изображена логарифмическая амплитудная характеристика звена, построенная по точной формуле (14.41) (штриховая) и по приближенной формуле (14.43). Величины ошибки δ в децибелах между характеристиками, построенными по точной и по приближенной формулам, следующие:

$\omega\tau$	0,1	0,25	0,4	0,5	1	2	2,5	4	10
δ	0,04	0,32	0,65	1	3,0	1	0,65	0,32	0,04

Наибольшее значение ошибки δ получается при $\omega\tau = 1$, т. е. при сопрягающей частоте $\omega_c = \frac{1}{\tau}$, когда $L_c(\omega) = 20 \lg \sqrt{2} = 20 \cdot 0,1492 \approx$ ≈ 3 дБ.

Таким образом, приближенная логарифмическая амплитудная характеристика дифференцирующего звена первого порядка состоит из двух отрезков прямых, сопряженных в точке $[\omega\tau = 1;\ L(\omega) = 0]$.

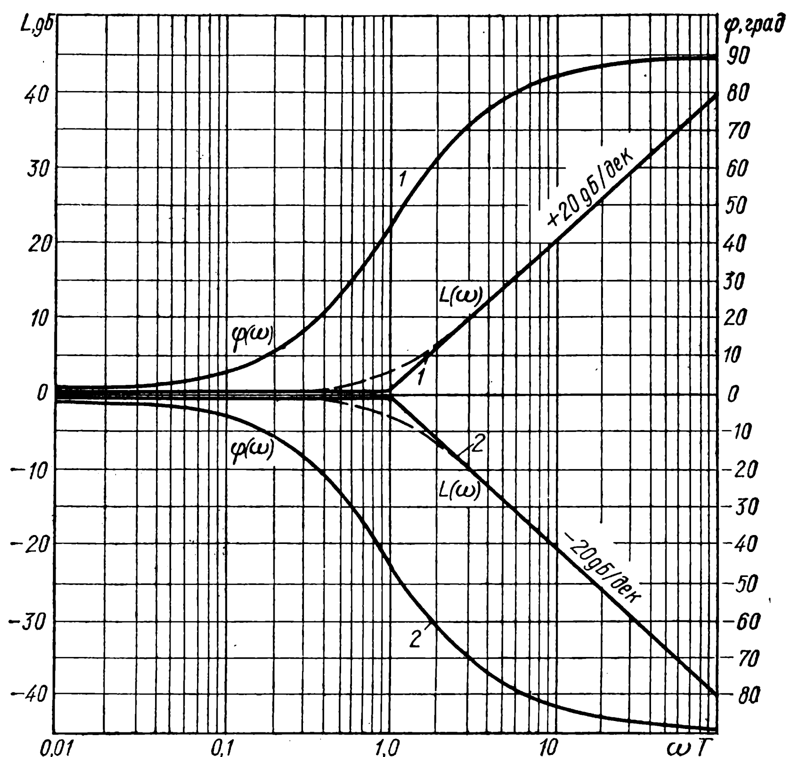


Рис. 14-16. Логарифмические амплитудные $L(\omega)$ и фазовые $\varphi(\omega)$ характеристики:

1 — дифференцирующего звена первого порядка; 2 — инерционного звена.

От начала координат до этой точки характеристика совпадает с осью абсцисс, а после этой точки идет вверх с положительным наклоном 20 дБ на декаду.

Логарифмическая фазовая частотная характеристика звена с учетом (14.39)

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)} = \operatorname{arctg} \frac{\omega\tau}{1} = \operatorname{arctg} \omega\tau. \qquad (14.44)$$

Для построения логарифмической фазовой характеристики также используется полулогарифмическая сетка, но по оси ординат здесь откладываются значения фазы $\varphi(\omega)$ в градусах.

На рис. 14-16 изображена логарифмическая фазовая характеристика рассматриваемого звена, построенная по следующим данным:

$\omega\tau$	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2	5	10	20	50
$\varphi(\omega\tau)$	2° 50′	5° 40′	11° 20′	26° 30′	45°	63° 30′	78° 40′	84° 20′	87° 10′	90°

2. Инерционное звено.

Передаточная функция звена

$$K(p) = \frac{1}{Tp+1}. \tag{14.45}$$

Амплитудно-фазовая характеристика звена с учетом (14.36)

$$K(j\omega) = \frac{1}{\omega^2T^2+1} - j\frac{\omega T}{\omega^2T^2+1}.$$

Модуль комплексного коэффициента

$$R(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\omega^2T^2+1}}.$$

Фазовый угол

$$\varphi(\omega) = -\mathrm{arctg}\,\omega T.$$

Тогда по (14.38) логарифмическая амплитудная характеристика

$$L(\omega) = 20\lg R(\omega) = -20\lg\sqrt{\omega^2T^2+1}. \tag{14.46}$$

Приближенное ее значение:

при $\omega \ll \frac{1}{T}$

$$L_1(\omega) = -20\lg 1 = 0;$$

при $\omega \gg \frac{1}{T}$

$$L_2(\omega) = -20\lg\omega.$$

Следовательно, приближенная логарифмическая амплитудная характеристика инерционного звена так же, как и дифференцирующего звена, состоит из двух отрезков прямых, сопряженных в точке $[\omega T = 1;\ L(\omega) = 0]$. От начала координат до этой точки характеристика также совпадает с осью абсцисс, но после этой точки в случае инерционного звена идет вниз с отрицательным наклоном —20 дБ на декаду (рис. 14-16).

Логарифмическая фазовая характеристика инерционного звена с учетом (14.39)

$$\varphi(\omega) = \mathrm{arctg}\frac{V(\omega)}{U(\omega)} = \mathrm{arctg}\frac{-\omega T}{\omega^2T^2+1}\,\frac{\omega^2T^2+1}{1} = -\mathrm{arctg}\,\omega T; \tag{14.47}$$

она также показана на рис. 14-16.

Логарифмические амплитудная и фазовая характеристики инерционного звена $K(p)=\frac{1}{Tp+1}$ отличаются от таковых дифференцирующего звена $K(p)=\tau p+1$ только знаком.

3. Интегрирующее звено.

Передаточная функция звена

$$K(p)=\frac{1}{Tp}. \tag{14.48}$$

Амплитудно-фазовая характеристика звена

$$K(j\omega)=\frac{1}{j\omega T}=-j\frac{1}{\omega T}.$$

Модуль комплексного коэффициента усиления

$$R(\omega)=\sqrt{\frac{1}{\omega^2T^2}}=\frac{1}{\omega T}.$$

Фазовый угол

$$\varphi(\omega)=-\frac{\pi}{2}.$$

Тогда логарифмическая амплитудная характеристика по (14.38)

$$L(\omega)=20\lg R(\omega)=20\lg\frac{1}{\omega T}=-20\lg\omega T. \tag{14.49}$$

Характеристика $L(\omega)$ изображается прямой с отрицательным наклоном —20 дБ на декаду, пересекающей ось абсцисс в точке $[\omega T=1;\ L(\omega)=0]$ (рис. 14-17).

Логарифмическая фазовая характеристика звена с учетом (14.39)

$$\varphi(\omega)=\operatorname{arctg}\frac{V(\omega)}{U(\omega)}=\operatorname{arctg}\frac{-\frac{1}{\omega T}}{0}=-\operatorname{arctg}\infty=-\frac{\pi}{2}. \tag{14.50}$$

Характеристика $\varphi(\omega)$ изображается прямой, параллельной оси абсцисс, удаленной от нее вниз на расстояние $-\frac{\pi}{2}$.

4. Безынерционное (усилительное) звено.

Передаточная функция звена

$$K(p)=k=\text{const}. \tag{14.51}$$

По аналогии с рассмотренными выше звеньями можем написать

$$K(j\omega)=k;$$
$$R(\omega)=\sqrt{k^2}=k;$$
$$\varphi(\omega)=0.$$

Тогда логарифмическая амплитудная характеристика по (14.38)

$$L(\omega)=20\lg R(\omega)=20\lg k. \tag{14.52}$$

Характеристика изображается в виде прямой, параллельной оси абсцисс и удаленной от нее вверх на расстояние $20 \lg k$ (рис. 14-17).

Логарифмическая фазовая характеристика звена по (14.39) получается

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\frac{V(\omega)}{U(\omega)} = \operatorname{arctg}\frac{0}{k} = 0, \tag{14.53}$$

т. е. совпадает с осью абсцисс.

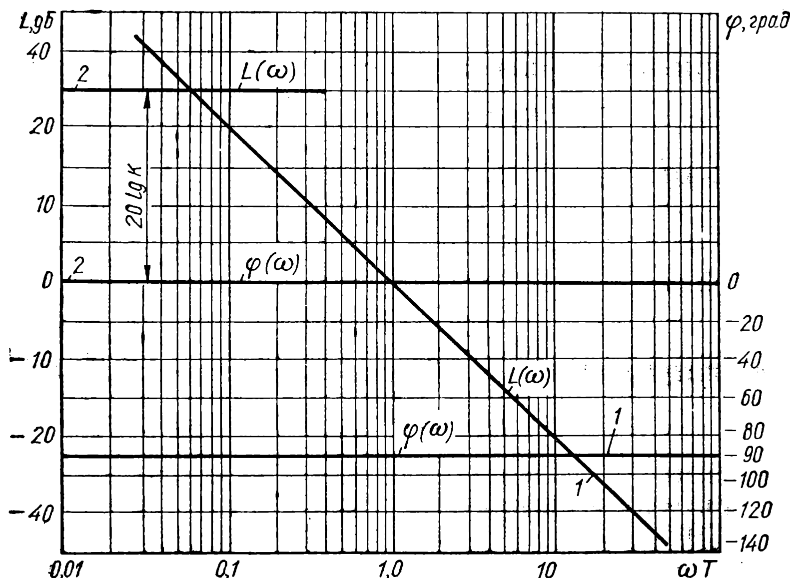


Рис. 14-17. Логарифмические амплитудные $L(\omega)$ и фазовые $\varphi(\omega)$ характеристики:

1 — интегрирующего звена; *2* — безынерционного (усилительного) звена.

Кроме рассмотренных, применяются также более сложные звенья [14-5]:

дифференцирующее звено второго порядка, наклонная часть характеристики которого имеет положительный наклон +40 дБ/дек;

колебательное звено, наклонная часть характеристики которого имеет отрицательный наклон —40 дБ/дек.

ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ АМПЛИТУДНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Полученных выше сведений о звеньях достаточно для построения амплитудной $L(\omega)$ и фазовой $\varphi(\omega)$ логарифмических характеристик сложной системы, передаточная функция которой равна произведению передаточных функций входящих в нее звеньев. Ниже рассматриваются логарифмические амплитудно-фазовые характеристики для системы автоматического регулирования и для следящей системы.

Пусть передаточная функция системы будет

$$K(p)=\frac{k(\tau_3 p+1)}{(T_1 p+1)(T_2 p+1)(T_4 p+1)^2}. \qquad (14.54)$$

Амплитудно-фазовая характеристика системы

$$K(j\omega)=\frac{k(\tau_3 j\omega+1)}{(T_1 j\omega+1)(T_2 j\omega+1)(T_4 j\omega+1)^2}.$$

Передаточная функция системы состоит из произведения передаточных функций звеньев: безынерционного (общего коэффициента усиления), четырех инерционных звеньев, два из которых имеют одинаковую постоянную времени T_4, и дифференцирующего звена первого порядка.

Для безынерционного звена логарифмические амплитудная и фазовая характеристики с учетом (14.52) и (14.53)

$$L(\omega)=20\lg k;$$
$$\varphi(\omega)=0.$$

Для первого инерционного звена с учетом (14.46) и (14.47) получим

$$L(\omega)=-20\lg\sqrt{\omega^2T_1^2+1};$$
$$\varphi(\omega)=-\operatorname{arctg}\omega T_1.$$

Для второго инерционного звена аналогично

$$L(\omega)=-20\lg\sqrt{\omega^2T_2^2+1};$$
$$\varphi(\omega)=-\operatorname{arctg}\omega T_2.$$

Для каждого из двух инерционных звеньев с одинаковой постоянной времени T_4

$$L(\omega)=-20\lg\sqrt{\omega^2T_4^2+1};$$
$$\varphi(\omega)=-\operatorname{arctg}\omega T_4.$$

Для дифференцирующего звена с учетом (14.41) и (14.44)

$$L(\omega)=+20\lg\sqrt{\omega^2\tau^2+1};$$
$$\varphi(\omega)=+\operatorname{arctg}\omega\tau_3.$$

Поскольку логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей, то в общем случае для построения логарифмической амплитудной характеристики системы следует построить порознь логарифмические амплитудные характеристики ее звеньев, а затем просуммировать их ординаты арифметически (рис. 14-18).

Логарифмическая амплитудная характеристика системы может быть построена и непосредственно по виду ее передаточной функции (14.54), т. е. без предварительного построения характеристик ее отдель-

ных звеньев. Пусть, например, постоянные времени звеньев и общий коэффициент усиления известны:

$$T_1 = 1{,}5\ \text{с};\ T_2 = 1{,}0\ \text{с};\ \tau_3 = 0{,}175\ \text{с};\ T_4 = 0{,}05\ \text{с};$$
$$k = 100.$$

Тогда сопрягающие частоты звеньев:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{1{,}5} = 0{,}66\ 1/\text{с};\quad \omega_2 = \frac{1}{1{,}0} = 1{,}0\ 1/\text{с};$$
$$\omega_3 = \frac{1}{0{,}175} = 5{,}7\ 1/\text{с};\quad \omega_4 = \frac{1}{0{,}05} = 20\ 1/\text{с}.$$

Значения этих частот наносятся на ось абсцисс (рис. 14-18).

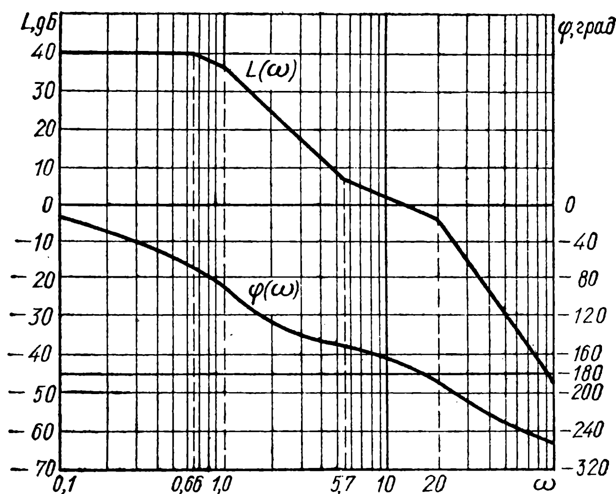


Рис. 14-18. Логарифмические амплитудная $L(\omega)$ и фазовая $\varphi(\omega)$ характеристики системы регулирования.

Характеристика строится в следующем порядке. Начиная с частоты $\omega = 0$ и до наименьшей сопрягающей частоты ω_1 проводится характеристика безынерционного звена $L(\omega)$ в виде прямой, параллельной оси абсцисс и отстоящей от нее в положительном направлении (вверх) на расстоянии

$$20\ \lg k = 20\ \lg 100 = 40\text{дБ}.$$

В интервале частот от ω_1 до ω_2 проводится прямая характеристика $L(\omega)$ первого инерционного звена с отрицательным наклоном —20 дБ на декаду.

В интервале частот от ω_2 до ω_3 проводится прямая характеристики $L(\omega)$ второго инерционного звена с дополнительным отрицательным наклоном —20 дБ на декаду, т. е. с общим наклоном к оси абсцисс —40 дБ на декаду.

В интервале частот от ω_3 до ω_4 проводится прямая характеристики $L(\omega)$ дифференцирующего звена с положительным наклоном к оси абсцисс +20 дБ на декаду, т. е. с общим наклоном —20 дБ на декаду.

Наконец, с отметки сопрягающей частоты ω_4 проводится прямая, общая для двух инерционных звеньев с одинаковыми постоянными времени T_4, под наклоном $2 \cdot 20 = 40$ дБ на декаду. Общий наклон характеристики системы становится равным —60 дБ на декаду.

Логарифмическая фазовая характеристика системы определяется путем суммирования характеристик звеньев, т. е. характеристик:

$$\varphi_1(\omega) = -\operatorname{arctg} T_1\omega = -\operatorname{arctg} 1,5 \cdot \omega;$$
$$\varphi_2(\omega) = -\operatorname{arctg} T_2\omega = -\operatorname{arctg} 1,0 \cdot \omega;$$
$$\varphi_3(\omega) = +\operatorname{arctg} \tau_3\omega = +\operatorname{arctg} 0,175 \cdot \omega;$$
$$2\varphi_4(\omega) = -2\operatorname{arctg} T_4\omega = -2\operatorname{arctg} 0,05 \cdot \omega.$$

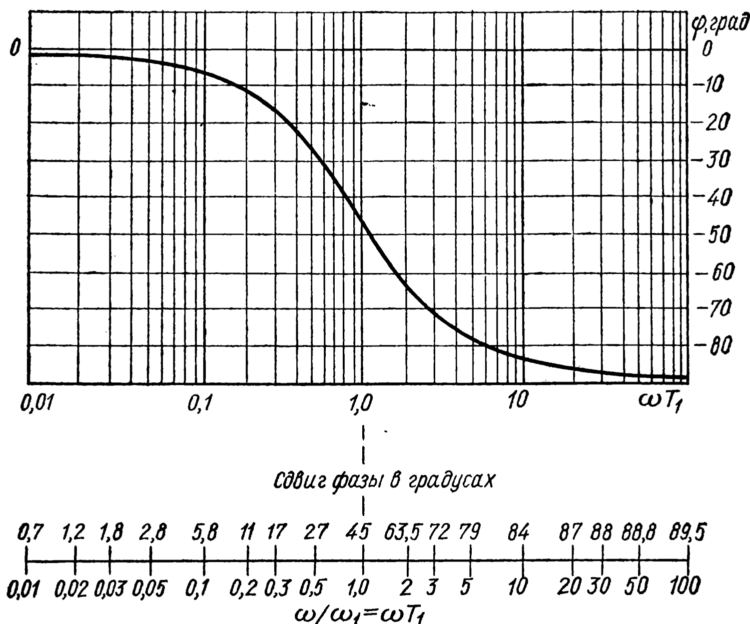


Рис. 14-19. Номограмма для построения логарифмической фазовой характеристики инерционного звена (и дифференцирующего звена первого порядка).

В общем случае каждая из этих характеристик звеньев может быть построена по точкам при различных значениях частоты. Данные соответствующих подсчетов сведены в табл. 6.

Для облегчения построения логарифмических фазовых характеристик звеньев, таких как инерционные и дифференцирующие звенья первого порядка, удобно пользоваться номограммой (рис. 14-19) [14-5]. Для того чтобы найти сдвиг фазы при какой-либо частоте, необходимо совместить точку 1,0 на нижней шкале номограммы с сопрягающей

Таблица 6

ω	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
$-\varphi_1^\circ$	9	17	37	56	72	83	86	88	89	89,5
$-\varphi_2^\circ$	6	11	27	45	64	79	84	87	89	89,5
$+\varphi_3^\circ$	1	2	5	10	19	41	60	73	84	87
$-2\varphi_4^\circ$	1	1	3	3	12	28	52	90	136	158
$-\sum\varphi^\circ$	15	27	62	94	129	149	164	192	231	250

частотой ω_c рассматриваемого звена и произвести отсчет фазы в градусах по верхней шкале номограммы. При этом масштабы по оси частот характеристики и номограммы должны совпадать.

Построение логарифмических фазовых характеристик этих звеньев можно также облегчить, если воспользоваться шаблоном, изготовленным в соответствии с кривой $\varphi(\omega)$, построенной на рис. 14-16.

Следящая система

Пусть передаточная функция системы будет

$$K(p) = \frac{k}{(T_1p+1)(T_2p+1)(T_3p+1)T_4p}. \qquad (14.55)$$

Амплитудно-фазовая характеристика системы

$$K(j\omega) = \frac{k}{(T_1j\omega+1)(T_2j\omega+1)(T_3j\omega+1)T_4j\omega}.$$

Логарифмические амплитудные и фазовые характеристики звеньев: для первого инерционного звена

$$L(\omega) = -20\lg\sqrt{\omega^2T_1^2+1};$$
$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}\omega T_1;$$

для второго инерционного звена

$$L(\omega) = -20\lg\sqrt{\omega^2T_2^2+1};$$
$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}\omega T_2;$$

для третьего инерционного звена

$$L(\omega) = -20\lg\sqrt{\omega^2T_3^2+1};$$
$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}\omega T_3;$$

для интегрирующего звена с учетом (14.49) и (14.50) получим

$$L(\omega) = -20 \lg \omega T_4;$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2};$$

для общего коэффициента усиления k, рассматриваемого как безынерционное звено,

$$L(\omega) = 20 \lg k;$$

$$\varphi(\omega) = 0.$$

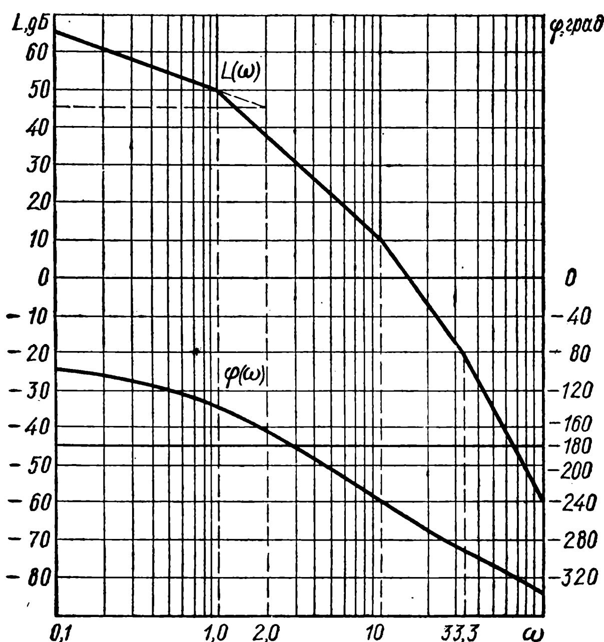


Рис. 14-20. Логарифмические амплитудная $L(\omega)$ и фазовая $\varphi(\omega)$ характеристики следящей системы.

Пусть постоянные времени звеньев и общий коэффициент усиления k известны и равны:

$$T_1 = 1 \text{ с}; \quad T_2 = 0{,}1 \text{ с}; \quad T_3 = 0{,}03 \text{ с}; \quad T_4 = 0{,}5 \text{ с}, \ k = 180.$$

Тогда сопрягающие частоты звеньев:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{1} = 1 \ 1/\text{с}; \quad \omega_2 = \frac{1}{0{,}1} = 10 \ 1/\text{с};$$

$$\omega_3 = \frac{1}{0{,}03} = 33{,}3 \ 1/\text{с}; \quad \omega_4 = \frac{1}{0{,}5} = 2 \ 1/\text{с}.$$

Разметив сопрягающие частоты на оси абсцисс (рис. 14-20), переходят к построению логарифмических амплитудных характеристик звеньев подобно тому, как это делалось при рассмотрении системы

регулирования. Однако наличие интегрирующего звена обусловливает некоторые особенности построения. В данном случае построение удобно начинать с интегрирующего звена.

Характеристика интегрирующего звена представляет собой прямую с отрицательным наклоном —20 дБ на декаду, пересекающую ось частот при $\omega_4 = 2$. Эта прямая должна быть проведена так, чтобы при $\omega_4 = 2$ ее ордината равнялась $20 \lg k = 20 \lg 180 = 20 \cdot 2{,}25 = 45$ дБ.

При $\omega = \omega_1 = 1$ на характеристику интегрирующего звена, имеющую наклон —20 дБ на декаду, накладывается характеристика первого инерционного звена, имеющая наклон —20 дБ на декаду. Поэтому в интервале частот $\omega_1 < \omega < \omega_2$ характеристика системы имеет уже наклон — 40 дБ на декаду.

При $\omega = \omega_2 = 10$ начинает сказываться эффект второго инерционного звена, и в интервале частот $\omega_2 < \omega < \omega_3$ наклон характеристики системы возрастает до —60 дБ на декаду.

При $\omega = \omega_3 = 33{,}3$ начинает проявляться влияние третьего инерционного звена. Поэтому при $\omega > \omega_3$ наклон характеристики системы возрастает еще на —20 дБ на декаду и делается равным —80 дБ на декаду (рис. 14-20).

Построение логарифмической фазовой характеристики системы можно выполнить путем сложения ординат фазовых характеристик отдельных звеньев по выражению

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^{4} \varphi_i(\omega),$$

где

$$\varphi_1(\omega) = -\mathrm{arctg}\, T_1\omega = -\mathrm{arctg}\, 1{,}0 \cdot \omega;$$
$$\varphi_2(\omega) = -\mathrm{arctg}\, T_2\omega = -\mathrm{arctg}\, 0{,}1 \cdot \omega;$$
$$\varphi_3(\omega) = -\mathrm{arctg}\, T_3\omega = -\mathrm{arctg}\, 0{,}03 \cdot \omega;$$
$$\varphi_4(\omega) = -\frac{\pi}{2}.$$

Таблица 7

ω	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
$-\varphi_1^\circ$	6	11	27	45	63,5	79	84	87	89	89,5
$-\varphi_2^\circ$	1	1	3	6	11	27	45	63,5	79	84
$-\varphi_3^\circ$	—	—	1	2	3,5	8,5	17	31	56	72
$-\varphi_4^\circ$	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
$-\sum_{i=1}^{4} \varphi_i^\circ$	97	102	121	143	168	204,5	236	271,5	314	333,5

Построение логарифмических фазовых характеристик звеньев в общем случае может быть выполнено, как и при рассмотрении системы регулирования, по точкам при различных значениях частоты, т. е. по данным, сведенным в табл. 7.

Для облегчения построения для инерционных звеньев может быть использована либо номограмма (рис. 14-19), либо шаблон, изготовленный в соответствии с кривой φ (ω), построенной на рис. 14-16.

УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ИХ ЛОГАРИФМИЧЕСКИМ ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Можно рассматривать три случая.

С л у ч а й 1. Система в разомкнутом состоянии устойчива и ее обычная амплитудно-фазовая характеристика не охватывает точки с координатами (—1, *j*0), т. е. не пересекает отрезок действительной оси на участке (—∞, —1). В этом случае в соответствии с критерием Найквиста — Михайлова можно сказать, что система в замкнутом состоянии является устойчивой в том случае, если всем точкам ее обычной амплитудно-фазовой характеристики вплоть до пересечения ее с окружностью единичного радиуса (с центром в начале координат) соответствуют значения фазы φ, большие чем (—π). Но поскольку 20 lg 1 = 0, то точке пересечения обычной амплитудно-фазовой характеристики с окружностью единичного радиуса соответствует точка пересечения логарифмической аплитудной характеристики с осью частот. Поэтому для логарифмических характеристик условие или критерий устойчивости можно записать так: для того чтобы система, устойчивая в разомкнутом состоянии и имеющая обычную амплитудно-фазовую характеристику, не пересекающую отрезок (— ∞, —1), была устойчива в замкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы при всех частотах, при которых логарифмическая амплитудная частотная характеристика неотрицательна, значения фазы φ (ω) превосходили (—π). Иллюстрация применения критерия приведена на рис. 14-21.

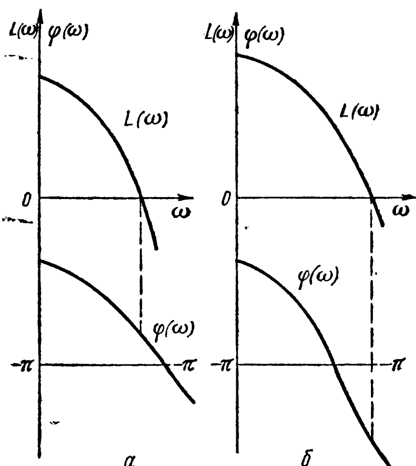


Рис. 14-21. Логарифмические характеристики системы:
а — устойчивой; *б* — неустойчивой.

С л у ч а й 2. Система в разомкнутом состоянии устойчива, но ее обычная амплитудно-фазовая характеристика имеет точки пересечения с отрезком действительной оси на участке (—∞, —1). В данном случае легко показать [14-5], что система будет устойчивой в замкнутом со-

стоянии в том случае, если разность между числами положительных (сверху вниз) и отрицательных (снизу вверх) переходов обычной амплитудно-фазовой характеристики отрезка (— ∞, —1) будет равна нулю.

Но в точках пересечения обычной амплитудно-фазовой характеристики с отрезком (— ∞, —1) логарифмическая амплитудная характеристика положительна, поскольку $20 \lg (1 + \cdot \cdot \cdot) > 0$, а логарифмическая фазовая характеристика пересекает прямую (—π) снизу вверх или сверху вниз, в зависимости от знака перехода. Поэтому, если условиться называть точку, в которой фазовая характеристика пересекает прямую (—π) снизу вверх, положительным переходом, а точку, в которой она пересекает прямую (—π) сверху вниз, отрицательным переходом, то в рассматриваемом случае критерий устойчивости

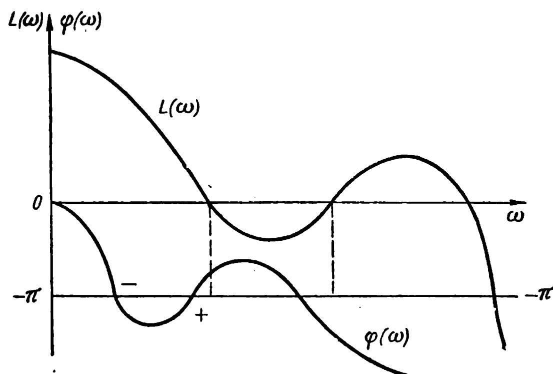


Рис. 14-22. Логарифмические характеристики устойчивой разомкнутой системы, устойчивой в замкнутом состоянии ($m = 0$).

для логарифмических характеристик можно записать так: для того чтобы система, устойчивая в разомкнутом состоянии, была устойчива и в замкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы при тех значениях ω, при которых логарифмическая амплитудная характеристика L (ω) неотрицательна, разность между числом положительных и отрицательных переходов между фазовой характеристикой φ (ω) и прямой (—π) равнялась нулю.

Иллюстрация применения критерия приведена на рис. 14-22.

Случай 3. Система в разомкнутом состоянии неустойчива. В этом случае в соответствии с критерием Найквиста — Михайлова можно сказать, что система в замкнутом состоянии будет устойчивой, если разность между числом положительных и отрицательных переходов обычной амплитудно-фазовой характеристики через отрезок (—∞, —1) действительной оси равна $m/2$, где m — число корней с положительной вещественной частью. Под положительными и отрицательными переходами подразумеваются переходы обычной амплитудно-фазовой характеристики через отрезок (—∞, —1) сверху вниз и снизу вверх соответственно. С учетом сказанного критерий устойчивости для логарифмической амплитудно-фазовой характеристики можно

записать так: для того чтобы система, характеристическое уравнение которой в разомкнутом состоянии имеет m корней с положительной вещественной частью, была устойчивой в замкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы разность между числом положительных и отрицательных переходов логарифмической фазовой характеристики через прямую $(-\pi)$ равнялась числу $m/2$ при тех значениях частоты ω, при которых логарифмическая амплитудная характеристика неотрицательна.

Иллюстрация применения критерия приведена на рис. 14-23.

Ниже приводится числовой пример применения метода логарифмических частотных характеристик.

Пример. *Дано:* разомкнутая система регулирования напряжения [14-3] состоит из трех инерционных звеньев первого порядка, описываемых дифференциальными уравнениями:

$$(T_1p+1)\,U_1=k_1U_0;$$
$$(T_2p+1)\,U_2=k_2U_1;$$
$$(T_3p+1)\,U_3=k_3U_2,$$

где

$T_1=0{,}5$ с; $T_2=0{,}76$ с;
$T_3=9{,}9$ с; $k_1=0{,}35$;
$k_2=1{,}13$; $k_3=25$.

Требуется: проверить устойчивость системы в замкнутом состоянии, пользуясь методом логарифмических амплитудно-фазовых характеристик.

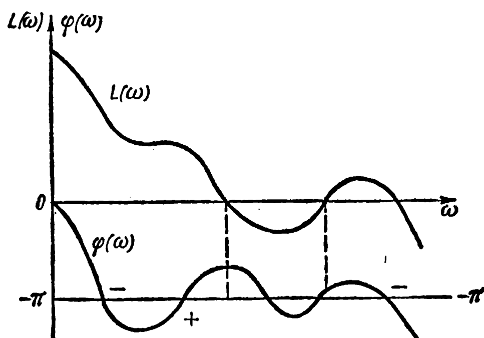


Рис. 14-23. Логарифмические характеристики неустойчивой разомкнутой системы ($m=2$), неустойчивой в замкнутом состоянии.

Решение. Перемножая правые и левые части уравнений звеньев, получим

$$(T_1p+1)(T_2p+1)(T_3p+1)\,U_3=k_1\cdot k_2\cdot k_3U_0,$$

или, обозначая $k_1\cdot k_2\cdot k_3=k_{1-3}$, получим передаточную функцию разомкнутой системы в виде

$$K(p)=\frac{U_3}{U_0}=\frac{k_{1-3}}{(T_1p+1)(T_2p+1)(T_3p+1)}.$$

Амплитудно-фазовая характеристика системы будет

$$K(j\omega)=\frac{k_{1-3}}{(T_1j\omega+1)(T_2j\omega+1)(T_3j\omega+1)}.$$

Поскольку система состоит из инерционных звеньев, она в разомкнутом состоянии заведомо устойчива.

Логарифмические амплитудные и фазовые характеристики звеньев:

для первого инерционного звена с учетом (14.46) и (14.47)

$$L(\omega)=-20\lg\sqrt{\omega^2T_1^2+1};$$
$$\varphi(\omega)=-\operatorname{arctg}\omega T_1;$$

для второго инерционного звена

$$L(\omega)=-20\lg\sqrt{\omega^2T_2^2+1};$$
$$\varphi(\omega)=-\operatorname{arctg}\omega T_2;$$

для третьего инерционного звена

$$L(\omega) = -20 \lg \sqrt{\omega^2 T_3^2 + 1};$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \omega T_3;$$

для безынерционного (усилительного) звена с учетом (14.52) и (14.53)

$$L(\omega) = 20 \lg k_{1-3};$$

$$\varphi(\omega) = 0.$$

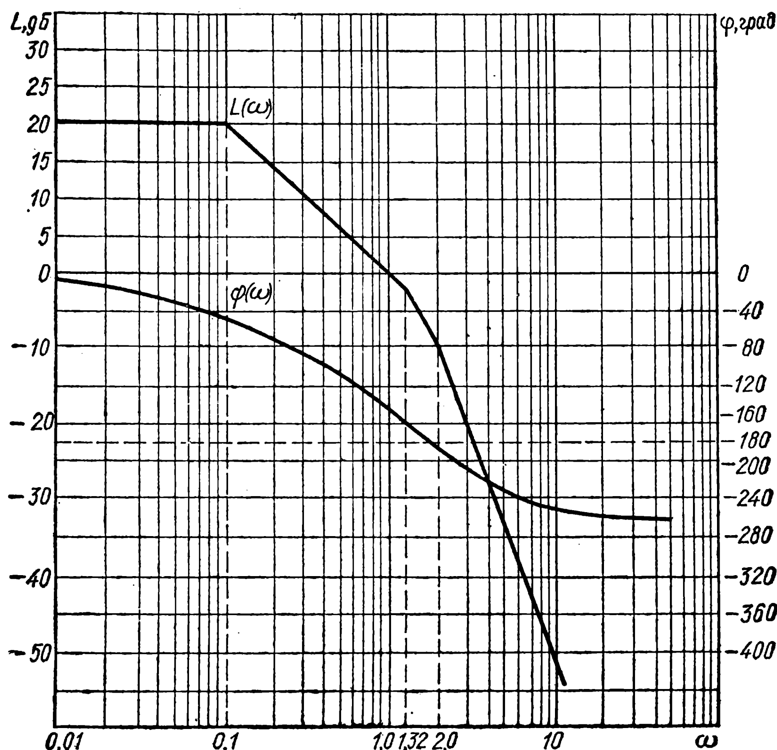


Рис. 14-24. Проверка устойчивости системы регулирования методом логарифмических частотных характеристик.

Определяем сопрягающие частоты звеньев:

$$\omega_1 = \frac{1}{0,5} = 2\ ^1/_c; \quad \omega_2 = \frac{1}{0,76} = 1,32\ ^1/_c;$$

$$\omega_3 = \frac{1}{9,9} = 0,1\ ^1/_c$$

и наносим их на оси частот (рис. 14-24).

Строим логарифмическую амплитудную характеристику системы в таком порядке. Начиная с частоты $\omega = 0$ до наименьшей сопрягающей частоты $\omega = \omega_3 = 0,1$, проводим характеристику безынерционного звена в виде прямой, параллельной оси абсцисс и отстоящей от нее в положительном направлении на

$$20 \lg k_{1-3} = 20 \lg k_1 k_2 k_3 = 20 \lg 0,35 \cdot 1,13 \cdot 25 = 20 \lg 9,9 \cong 20 \text{ дБ}.$$

В интервале частот от $\omega_3 = 0{,}1$ до $\omega_2 = 1{,}32$ проводим прямую характеристики $L(\omega)$ первого инерционного звена с отрицательным наклоном —20 дБ на декаду.

В интервале частот от $\omega_2 = 1{,}32$ до $\omega_1 = 2$ проводим прямую характеристики второго инерционного звена с дополнительным отрицательным наклоном — 20 дБ на декаду, т. е. с общим наклоном к оси частот —40 дБ на декаду.

Начиная с последней сопрягающей частоты $\omega_1 = 2$, проводим прямую характеристики третьего инерционного звена с дополнительным отрицательным наклоном —20 дБ на декаду, т. е. с общим наклоном к оси частот — 60 дБ на декаду.

Строим логарифмическую фазовую характеристику системы. Она может быть построена как сумма фазовых характеристик отдельных звеньев, т. е.:

$$\varphi_1(\omega) = -\operatorname{arctg} T_1\omega = -\operatorname{arctg} 0{,}5 \cdot \omega;$$
$$\varphi_2(\omega) = -\operatorname{arctg} T_2\omega = -\operatorname{arctg} 0{,}76 \cdot \omega;$$
$$\varphi_3(\omega) = -\operatorname{arctg} T_3\omega = -\operatorname{arctg} 9{,}9 \cdot \omega.$$

Подставляя в эти выражения значения ω в пределах от $\omega = 0{,}01$ до $\omega = 10$, получим данные, сведенные в табл. 8.

Таблица 8

ω	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
$-\varphi_1^0$	—	1	2	3	6	14	26	45	68	79	84	88	89
$-\varphi_2^0$	—	1	2	4	9	21	37	57	75	82,5	86	89	89
$-\varphi_3^0$	6	11	26	45	63	79	84	87	89	89	90	90	90
$-\sum_{i=1}^{3} \varphi_i^0$	6	13	30	52	78	114	147	189	232	250,5	260	267	268

По этим данным построена логарифмическая фазовая характеристика системы (рис. 14-24). Поскольку полученная характеристика $\varphi(\omega)$ пересекает прямую $(-\pi)$ при отрицательном значении логарифмической амплитудной характеристики $L(\omega)$, то рассмотренная система регулирования напряжения устойчива также и в замкнутом состоянии.

Глава пятнадцатая

РАСЧЕТ ОБЛАСТЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО СПОСОБУ Д-РАЗБИЕНИЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Параметрами системы автоматического регулирования являются, как известно, постоянные времени и коэффициенты усиления звеньев системы. Все эти параметры применительно к автоматизации энергетических систем могут быть разделены на три основные группы.

К первой группе относятся параметры основных звеньев системы регулирования — генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и т. п. Эти параметры не могут быть изменены ни при конструировании, ни при эксплуатации регулятора. Поэтому они называются заданными параметрами.

Ко второй группе относятся параметры вспомогательного оборудования — это постоянные времени возбудителей, а также различных звеньев регулятора возбуждения. Эти параметры могут выбираться в процессе конструирования регулятора достаточно произвольно, но в процессе эксплуатации, в условиях наладки и настройки они уже изменяться не могут. Поэтому они называются конструктивными параметрами.

К третьей группе относятся параметры регулятора, которые используются для изменения его настройки. Сюда относятся параметры обратных связей, а также коэффициенты усиления усилительных и дифференцирующих звеньев, которые можно изменять в процессе эксплуатации. Поэтому эти параметры называются настроечными.

В зависимости от состояния конструктивных и настроечных параметров анализ устойчивости системы регулирования можно вести в одном из следующих двух направлений [15-1, 15-2].

Первое направление характеризуется тем, что здесь отыскивается ответ на вопрос, устойчива ли система регулирования или неустойчива. В этом случае предполагается, что все основные и конструктивные параметры заведомо известны и выбраны все настроечные параметры. При этом анализ устойчивости носит проверочный характер и для него может быть использован любой из известных алгебраических или частотных критериев устойчивости (Рауса — Гурвица, Михайлова и др.).

Второе направление характеризуется тем, что здесь отыскивается вся область возможных значений конструктивных и настроечных параметров, при которых система регулирования остается устойчивой. В этом случае предполагается, что только основные параметры определены однозначно, т. е. заданы. Анализ устойчивости при этом сводится к построению некоторой границы области устойчивости, в пределах которой можно изменять значения конструктивных или настроечных параметров, или, как говорят, к построению границы области устойчивости в пространстве конструктивных или настроечных параметров.

Границей области устойчивости называют совокупность точек пространства параметров системы, отделяющих область устойчивости от области неустойчивости. Выявление всех возможных значений конструктивных и настроечных параметров, при которых система продолжает оставаться устойчивой, особенно важно при конструировании новых систем регулирования. Важно оно также и для эксплуатации существующих систем, для их наладки и настройки.

Построение областей устойчивости можно вести как в пространстве параметров системы, так и в пространстве коэффициентов характеристического уравнения, отражающих эти параметры. Практически представление об области устойчивости легче составить сначала на примере определения области устойчивости в плоскости коэффициентов характеристического уравнения.

Пусть в характеристическом уравнении

$$f(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + a_2p^{n-2} + \cdots + a_{n-1}p + a_n = 0 \quad (15.1)$$

известны все коэффициенты, кроме каких-либо двух (например, a_1 и a_n). Выберем в плоскости с декартовыми координатами a_1 и a_n (рис. 15-1) в первом квадранте, где $a_1 > 0$ и $a_n > 0$, произвольную точку и подставим в уравнение (15.1) значения a_1 и a_n, соответствующие этой точке. Если все корни уравнения (15.1) при этом получаются отрицательными, т. е. расположены слева от оси мнимых

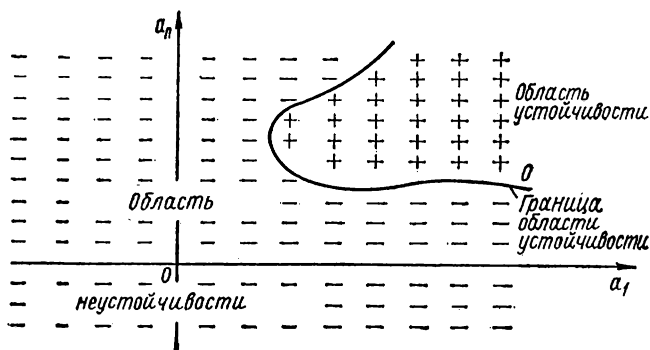


Рис. 15-1. Плоскость коэффициентов характеристического уравнения.

величин плоскости корней (рис. 15-2), то выбранную на рис. 15-1 точку отметим знаком «+». Если же хотя бы один корень получается положительным, т. е. расположенным справа от этой оси плоскости корней, то выбранную на рис. 15-1 точку отметим знаком «—». Рассматривая последовательно все возможные сочетания значений $a_1 > 0$, $a_n > 0$, отметим знаками «+» или «—» каждую из точек плоскости a_n, a_1 (рис. 15-1).

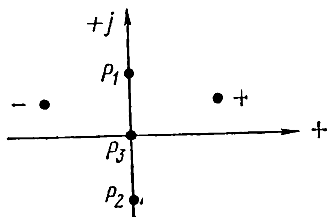


Рис. 15-2. Плоскость корней p характеристического уравнения: p_1, p_2, p_3 — корни, соответствующие границе области устойчивости.

Поскольку в первом квадранте есть точки, отмеченные знаками «+» и «—», то, следовательно, должны быть и точки, отмеченные «нулем», т. е. точки, соответствующие хотя бы одному нулевому или паре чисто мнимых сопряженных корней в плоскости корней (рис. 15-2). Если через эти «нулевые» точки в плоскости a_n, a_1 провести кривую, то получим границу области устойчивости в плоскости двух рассматриваемых коэффициентов a_1 и a_n характеристического уравнения (15.1). При этом вся совокупность точек, отмеченных знаком «+», окажется областью устойчивости системы регулирования, а знаком «—» — областью неустойчивости.

Таким образом, граница области устойчивости в плоскости коэффициентов характеристического уравнения (рис. 15-1) соответствует оси мнимых в плоскости корней этого уравнения (рис. 15-2). Переход

коэффициентов характеристического уравнения через границу со стороны области устойчивости в область неустойчивости соответствует переходу хотя бы одного действительного или пары сопряженно-комплексных корней через ось мнимых величин с левой части в правую часть плоскости корней.

Понятие о границе области устойчивости в плоскости параметров характеристического уравнения можно составить следующим образом. Пусть заданы или определены в составе коэффициентов характеристического уравнения все параметры системы, кроме какого-либо одного из них. Пусть этим неизвестным параметром будет, например, постоянная времени T одного из звеньев системы. В этом случае можно определить область устойчивости системы регулирования по этому одному параметру T. Действительно, если придать постоянной времени T какое-либо значение, то тогда все коэффициенты характеристического уравнения n-го порядка (15.1) будут определены и, следовательно, каждому значению постоянной времени T будут соответствовать n значений корней, которые в общем случае могут быть действительными, мнимыми или комплексными. В зависимости от того, все ли корни лежат слева от оси мнимых величин плоскости корней (рис. 15-2) или имеется хотя бы один корень справа от нее или же лежит на ней, можно каждую точку числовой полуоси параметра T отметить соответственно знаком «+», «—» или «0» (рис. 15-3). Совокупность точек с отметкой «+» составляет область устойчивости системы по параметру T, с отметкой «—» — область неустойчивости, а точка с отметкой «0» является границей области устойчивости по этому параметру.

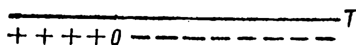


Рис. 15-3. Числовая полуось параметра T с разметкой областей: устойчивости (+), неустойчивости (—) и границы устойчивости по параметру T (0).

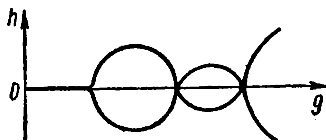


Рис. 15-4. Граница Д-разбиения по действительным значениям параметра μ, определяемая точками пересечения кривой Д-разбиения с действительной осью g.

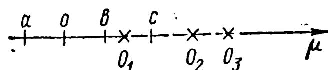


Рис. 15-5. Области действительных значений μ с одинаковым для каждой из них числом отрицательных корней.

Аналогично вводится понятие о границе области устойчивости и в плоскости каких-либо двух параметров, например, в плоскости двух постоянных времени, двух коэффициентов усиления или же в плоскости постоянной времени и коэффициента усиления (рис. 15-4).

На рис. 15-5 показана аналогичным образом полученная граница области устойчивости в пространстве трех параметров; могут быть получены границы области устойчивости и в многомерном пространстве параметров в виде гиперповерхности, соответствующей тому или иному множеству рассматриваемых параметров.

ПОНЯТИЕ О Д-РАЗБИЕНИИ ПРОСТРАНСТВА ПАРАМЕТРОВ

Составив представление о границе области устойчивости в пространстве параметров, условимся далее обозначать каждую точку плоскости рассматриваемых параметров не знаком «+» (когда в этой точке все корни характеристического уравнения лежат слева от оси мнимых величин плоскости корней) и не знаком «—» (когда в этой точке имеется хотя бы один корень, лежащий справа от этой оси), а числом m, указывающим число корней, лежащих слева от оси мнимых величин плоскости корней. Следовательно, будем для каждой точки параметров фиксировать число корней, расположенных слева от оси мнимых величин. Очевидно, что в плоскости параметров обнаружим ряд точек, которым будет соответствовать одинаковое число корней, расположенных слева от оси мнимых величин плоскости корней.

Такое разбиение плоскости параметров на области с одинаковым числом корней с отрицательной действительной частью впервые было введено Ю. И. Неймарком и получило название Д-разбиения. Кривые, разделяющие плоскость исследуемых параметров на области с одинаковым числом отрицательных корней, называются границами Д-разбиения. Та область параметров, в которой число отрицательных корней наибольшее, а число положительных корней равно нулю, является областью устойчивости.

Граница Д-разбиения соответствует тем значениям параметров, при которых характеристическое уравнение содержит хотя бы один корень, лежащий на оси мнимых величин плоскости корней. Или, другими словами, каждой точке границы Д-разбиения соответствует значение на оси мнимых величин, являющееся корнем соответствующего характеристического уравнения. Отсюда следует, что кривая Д-разбиения в пространстве параметров соответствует оси мнимых величин в плоскости корней.

Из изложенного вытекает простой способ построения границы Д-разбиения. Для этого подставим в характеристическое уравнение (15.1) значение $p = j\omega$ (корень на оси мнимых величин) и, отделив действительную часть от мнимой, получим равенство

$$f(j\omega) = g(\omega) + jh(\omega) = 0. \qquad (15.2)$$

Это равенство возможно, если функции

$$g(\omega) = 0 \text{ и } h(\omega) = 0.$$

Зададим ω какое-либо значение ω_1. Тогда функции $g(\omega_1)$ и $h(\omega_1)$ будут зависеть только от коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ характеристического уравнения. Следовательно, если эти коэффициенты одновременно удовлетворяют условию

$$g(\omega_1) = 0 \text{ и } h(\omega_1) = 0,$$

то этим определяется одна точка границы Д-разбиения (корень на оси мнимых величин плоскости параметров).

Задаваясь значением $\omega = \omega_2$, таким же способом находим другую точку границы Д-разбиения. Придавая ω различные значения от $-\infty$ до $+\infty$, можно построить всю границу Д-разбиения. Д-разбиение может выполняться по одному, по двум, а также по трем и большему числу параметров.

Д-РАЗБИЕНИЕ ПО ОДНОМУ ПАРАМЕТРУ

Решим характеристическое уравнение относительно любого параметра, например любой постоянной времени T или любого коэффициента усиления K, и обозначим его в общем случае через μ. Тогда, вводя подстановку $p = j\omega$, а также разделяя действительные и мнимые величины, получаем

$$\mu = g(\omega) + jh(\omega).$$

Для построения границы Д-разбиения по параметру μ рассмотрим плоскость с координатами g и h, которую назовем плоскостью параметра μ. Задаваясь значением $\omega = \omega_1$, подсчитываем для него функции $g(\omega_1)$ и $h(\omega_1)$, которые определят положение соответствующей точки в плоскости параметра μ.

Задаваясь значением $\omega = \omega_2$, находим новые значения $g(\omega_2)$ и $h(\omega_2)$, определяющие положение другой точки в плоскости μ. Изменяя ω от $-\infty$ до $+\infty$, получаем все точки кривой границы Д-разбиения (рис. 15-4).

Построение кривой Д-разбиения можно упростить, если учесть, что часть ее, соответствующая значениям ω от $-\infty$ до 0, является зеркальным отображением другой части ее, соответствующей значениям ω от 0 до $+\infty$. Поэтому по точкам можно строить только часть кривой, соответствующую значениям ω от 0 до $+\infty$, а другую часть ее достроить как зеркальное отображение первой.

При построении кривой Д-разбиения (рис. 15-4) предполагалось, что параметр μ в общем случае представляет собой комплексное число. В действительности же параметр μ, представляющий собой либо постоянную времени, либо коэффициент усиления, может принимать лишь значения действительных чисел. Поэтому может представлять интерес не вся граница Д-разбиения, а лишь разбиение действительной оси, т. е. по действительным значениям параметра μ, получаемым в точках пересечения кривой Д-разбиения с осью действительных величин g. Полученные таким путем области действительных значений μ, показанные разными линиями на рис. 15-5, соответствуют характеристическим уравнениям , имеющим то или иное, но одинаковое число корней слева от оси мнимых величин плоскости корней.

Остается еще невыясненным, какое число отрицательных корней имеет характеристическое уравнение при том или ином значении параметра μ. Решение этого вопроса и, как следствие, выделение области устойчивости достигается путем штриховки кривой Д-разбиения, выполняемой по указанным ниже правилам. До этого можно лишь утверждать, что рассматриваемое характеристическое уравнение как при $\mu = a$, так и при $\mu = b$ имеет одно и то же число отрицательных корней, а при $\mu = c$ это же уравнение имеет другое число их.

ШТРИХОВКА ГРАНИЦЫ Д-РАЗБИЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ОДНОГО ПАРАМЕТРА И ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ

Правила штриховки границы Д-разбиения и выделение области устойчивости можно уяснить следующим путем. Известно, что при перемещении в плоскости корней по оси мнимых величин (рис. 15-6) из $-\infty$ до $+\infty$ область, в которой располагаются корни характеристического уравнения при устойчивой системе регулирования, всегда будет слева от этой оси. В соответствии с этим заштрихуем ось мнимых величин слева. Предположим теперь, что по какому-либо параметру μ в плоскости параметров построена граница Д-разбиения, показанная на рис. 15-7. Поскольку кривая Д-разбиения в плоскости параметров отображает ось мнимых величин в плоскости корней, то, перемещаясь вдоль границы Д-разбиения из точки $\omega = -\infty$ к точке $\omega = +\infty$, будем штриховать эту кривую также слева.

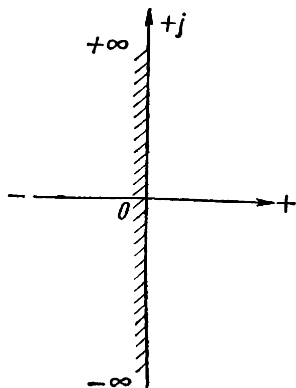


Рис. 15-6. Заштрихованная слева ось мнимых величин в плоскости корней, отображающая заштрихованную кривую Д-разбиения в плоскости параметров.

В результате штриховки на плоскости параметров получились три различные области. Каждой точке плоскости параметров соответствуют вполне определенное значение параметра μ, определенные коэффициенты характеристического уравнения и определенное расположение корней в плоскости корней. Если на плоскости параметров (рис. 15—7, *а*) точке μ_1 соответствует r отрицатель-

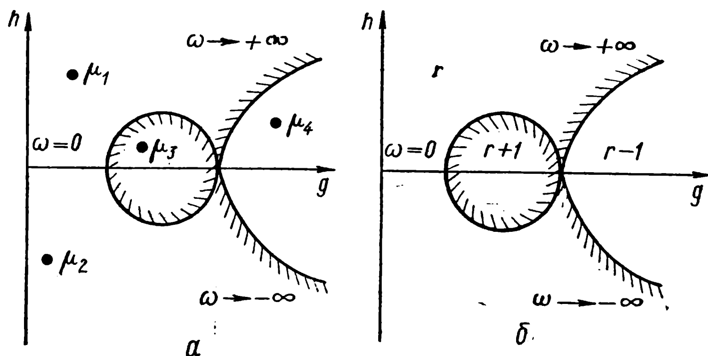


Рис. 15-7. Разделение плоскости на области с одинаковым числом отрицательных корней (*а*) и выявление области с наибольшей отметкой, претендующей на устойчивость (*б*).

ных корней, то эти же r корней соответствуют и точке μ_2, поскольку можно из точки μ_1 перейти в точку μ_2, не пересекая границы Д-разбиения. Точки μ_1 и μ_2, таким образом, принадлежат одной области

параметров. Точка μ_3 принадлежит другой области параметров, поскольку из точки μ_1 нельзя перейти в точку μ_3, не пересекая один раз кривой Д-разбиения. И так как переход при этом происходит из незаштрихованной стороны кривой в заштрихованную, что соответствует переходу одного корня через ось мнимых величин справа налево, то, следовательно, точке μ_3 соответствует число отрицательных корней на единицу больше, чем точке μ_1, т. е. $r + 1$.

Точка μ_4 принадлежит третьей области параметров, поскольку из точки μ_1 можно попасть в точку μ_4, только пересекая кривую Д-разбиения. Но так как при этом переход происходит с заштрихованной стороны кривой в незаштрихованную, что соответствует переходу одного корня через ось мнимых величин слева направо, то, следовательно, точке μ_4 соответствует число отрицательных корней на единицу меньше, чем точке μ_1, т. е. $r - 1$.

Таким образом, вся рассмотренная плоскость параметров (рис. 15-7, *а*) оказалась разделенной на три области, каждая из которых соответствует характеристическому уравнению с соответствующим числом отрицательных корней, т. е. с числом корней r, $r + 1$ и $r - 1$.

Выявление области устойчивости в рассматриваемом случае (при характеристическом уравнении третьего порядка) можно произвести следующим путем. Пусть при каком-либо значении параметра μ, например при $\mu = 0$ (начало координат), решение характеристического уравнения дает один положительный или нулевой корень и два корня отрицательных. Тогда области с отметкой r, включающей и начало координат, будут соответствовать два отрицательных корня, т. е. $r = 2$. Области с отметкой $r + 1$ будут соответствовать $2 + 1 = 3$ отрицательных корня, а области с отметкой $r - 1$ будет соответствовать $2 - 1 = 1$ отрицательный корень. Ясно, что областью устойчивости соответствующей системы регулирования является область с наибольшей отметкой ($r + 1$), которой соответствуют все три возможных корня с отрицательной вещественной частью.

Таким образом, зная число отрицательных корней, которое имеет характеристическое уравнение при каком-либо одном значении параметра μ, и построив кривую Д-разбиения, можно выделить область, претендующую на устойчивость. Такой областью будет область, имеющая самую большую отметку отрицательных корней, т. е. корней с отрицательной действительной частью (например, на рис. 15-7, *б* область с отметкой $r + 1$).

Если известно, что самая большая отметка равна степени характеристического уравнения n, то область с такой отметкой действительно является областью устойчивости. Если же самая большая отметка меньше показателя степени n характеристического уравнения, то область устойчивости в плоскости рассматриваемого параметра вообще не существует, т. е. при любом значении параметра μ система не может быть устойчивой.

Пример 1. *Дано:* система регулирования описывается характеристическим уравнением

$$a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0,$$

где коэффициенты характеристического уравнения*: $a_0 = 3,76$; $a_1 = 12,83$; $a_2 = 11,16$; $a_3 = K_{1-3} + 1 = K_1 K_2 K_3 + 1$; $K_1 = \frac{K_p}{n_н}$ — коэффициент усиления звена регулятора с учетом коэффициента трансформации трансформатора напряжения, равного $n_н = \frac{6300}{220}$; K_p = коэффициент усиления звена регулятора без учета трансформатора напряжения; $K_2 = 1,13$ — коэффициент усиления звена возбудителя; $K_3 = 25$ — коэффициент усиления звена генератора.

В качестве настроечного параметра рассматривается коэффициент K_1.

Требуется: по способу Д-разбиения плоскости по одному параметру определить область возможных значений коэффициента усиления системы K_{1-3} и область значений настроечного параметра K_1, при которых заданная система регулирования будет оставаться устойчивой.

Решение. Подставляя в характеристическое уравнение значения всех его коэффициентов, кроме коэффициента a_3, получаем

$$3,76p^3 + 12,83p^2 + 11,16p + a_3 = 0, \qquad (15.3)$$

откуда

$$a_3 = -3,76p^3 - 12,83p^2 - 11,16p.$$

Подставляя $p = j\omega$, получим

$$a_3 = 3,76j\omega^3 + 12,83\omega^2 - 11,16j\omega,$$

или, разделив действительную и мнимую части, найдем

$$a_3 = g(\omega) + jh(\omega),$$

где

$$g(\omega) = 12,83\omega^2;$$
$$h(\omega) = 3,76\omega^3 - 11,16\omega.$$

Придавая различные значения ω от $\omega = -\infty$ до $\omega = +\infty$, можно в плоскости с декартовыми координатами g и h построить всю кривую Д-разбиения. Практически, однако, достаточно построить по точкам только часть кривой при изменении ω от 0 до $+\infty$, поскольку вторая ее часть, соответствующая изменению ω от 0 до $-\infty$, может быть достроена как зеркальное отображение первой ее части относительно оси вещественных величин g.

В табл. 9 приведены значения величин $g(\omega)$ и $h(\omega)$ при положительных значениях ω. По этим данным на рис. 15-8 построена искомая кривая Д-разбиения и показана ее штриховка.

Таблица 9

ω	$g(\omega)$	$h(\omega)$	ω	$g(\omega)$	$h(\omega)$
0	0	0	2	51,3	7,6
1	12,83	—7,4	2,5	80,0	31,0
1,5	28,8	—4,0	3	115	69,5
1,72	38,0	0			

Для отыскания области с наибольшей отметкой, т. е. области, претендующей на устойчивость, а также для того чтобы убедиться в существовании области устойчивости вообще, установим сначала, сколько отрицательных корней имеет характеристическое уравнение при каком-либо одном значении коэффициента a_3. Пусть это значение будет $a_3 = 0$.

* См. пример 1 в гл. 14.

Уравнение (15.3) при этом принимает вид

$$3{,}76p^3 + 12{,}83p^2 + 11{,}16p = 0,$$

или

$$p\,(3{,}76p^2 + 12{,}83p + 11{,}16) = 0.$$

Корнями этого уравнения будут:

$$p_1 = 0;\ p_{2,3} = \frac{-\frac{12{,}83}{2} \pm \sqrt{\frac{12{,}83^2}{4} - 3{,}76 \cdot 11{,}16}}{3{,}76} < 0,$$

т. е. один корень нулевой, а два — отрицательные (лежащие слева от оси мнимых величин плоскости корней).

Поскольку при $a_3 = 0$ началу координат плоскости параметров соответствуют два отрицательных корня, т. е. $r = 2$, то этому же числу отрицательных корней r соответствуют и все другие точки плоскости, в которые можно попасть из начала координат, не пересекая кривой Д-разбиения.

Область, в которую попадем из области с отметкой r, переходя кривую Д-разбиения из незаштрихованной части в заштрихованную, будет областью с отметкой $r + 1$; область, в которую перейдем через кривую с заштрихованной части в незаштрихованную, будет с отметкой $r - 1$. Областью, претендующей на устойчивость, является область с наибольшей отметкой $r + 1$. Так как эта область соответствует числу корней $r + 1 = 2 + 1 = 3$, т. е. числу отрицательных корней, равному степени характеристического уравнения $n = 3$, то она действительно является областью устойчивости.

Рис. 15-8. Искомая кривая Д-разбиения и ее штриховка.

Поскольку параметр $a_3 = K_{1-3} + 1$, т. е. представляет собой, по существу, коэффициент усиления K_{1-3} системы, существенны только действительные значения параметра a_3, принадлежащие области устойчивости (рис. 15-8). Эти значения определяются отрезком оси g, лежащим внутри области с отметкой $r+1$. Следовательно, условию устойчивости системы будет отвечать целая полоса получаемых из графика значений коэффициента a_3, т. е. полоса значений a_3 в пределах

$$0 < a_3 \leqslant 38,$$

или

$$0 < (K_{1-3} + 1) \leqslant 38.$$

Следовательно, предельное значение коэффициента усиления системы

$$K'_{1-3} = K_1K_2K_3 = 38 - 1 = 37.$$

Заметим, что это же предельное значение коэффициента усиления рассматриваемой системы регулирования было получено и с помощью критерия устойчивости А. В. Михайлова, где оно было определено графически, как ближайшее расстояние между точками характеристической кривой (годографа), лежащими на оси вещественных (см. рис. 14-6).

Предельное значение рассматриваемого настроечного параметра

$$K_1 = \frac{37}{K_2K_3} = \frac{37}{1{,}13 \cdot 25} = 1{,}31.$$

Принимая коэффициент трансформации трансформатора напряжения неизменным, т. е. равным $n_н = \frac{6300}{220}$, предельное значение коэффициента усиления собственно регулятора

$$K_р = K_1 n_н = 1,31 \frac{6300}{220} = 37,5.$$

При других возможных значениях коэффициента усиления системы, т. е. при $K_{1-3} < 37$, значения настроечного параметра K_1, а следовательно и коэффициента усиления собственно регулятора $K_р$ будут соответственно другими.

Д-РАЗБИЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ДВУХ ПАРАМЕТРОВ

Предположим, что некоторые параметры системы регулирования μ и λ входят в коэффициенты характеристического уравнения (15.1) линейно, т. е. так, что ни в одном из коэффициентов нет ни высших степеней, ни произведений этих параметров. Представляет интерес, пользуясь способом Д-разбиения, выяснить область возможных значений параметров μ и λ, при которых система будет оставаться устойчивой или, как говорят, выявить устойчивость в плоскости параметров μ и λ.

Для определенности по оси ординат плоскости μ, λ будем откладывать значения параметра λ, а по оси абсцисс — параметра μ. Тогда для получения границы Д-разбиения преобразуем характеристическое уравнение к виду

$$D(p) = \mu P(p) + \lambda Q(p) + R(p) = 0,$$

где $P(p)$, $Q(p)$ и $R(p)$ — действительные полиномы от p, не содержащие рассматриваемых параметров μ и λ.

Положив $p = j\omega$ (корень на оси мнимых величин), получим

$$D(j\omega) = \mu P(j\omega) + \lambda Q(j\omega) + R(j\omega) = 0,$$

или, разделив $D(j\omega)$ на действительную $g(\omega)$ и мнимую $h(\omega)$ части и порознь приравняв их нулю, находим два уравнения:

$$\left.\begin{aligned} g(\omega) = \mu P_1(\omega) + \lambda Q_1(\omega) + R_1(\omega) = 0; \\ h(\omega) = \mu P_2(\omega) + \lambda Q_2(\omega) + R_2(\omega) = 0, \end{aligned}\right\} \quad (15.4)$$

где $P_1(\omega)$, $P_2(\omega)$, $Q_1(\omega)$, $Q_2(\omega)$, $R_1(\omega)$ и $R_2(\omega)$ — полиномы от ω, не содержащие параметров μ и λ.

Решая систему уравнений (15.4), получаем [15-1]

$$\mu = \frac{\Delta_1}{\Delta} \text{ и } \lambda = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (15.5)$$

где Δ — главный определитель, имеющий вид

$$\Delta = \begin{vmatrix} P_1(\omega) & Q_1(\omega) \\ P_2(\omega) & Q_2(\omega) \end{vmatrix} = P_1(\omega) Q_2(\omega) - P_2(\omega) Q_1(\omega), \quad (15.6)$$

т. е. главный определитель составлен так, чтобы в первом столбце находились полиномы при откладываемом по оси абсцисс параметре μ, что согласуется с принятым выше размещением параметров μ и λ по осям координат.

Остальные определители и их решения имеют вид

$$\left.\begin{aligned}\Delta_1 &= \begin{vmatrix} -R_1(\omega) & Q_1(\omega) \\ -R_2(\omega) & Q_2(\omega) \end{vmatrix} = R_2(\omega)\,Q_1(\omega) - R_1(\omega)\,Q_2(\omega); \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} P_1(\omega) & -R_1(\omega) \\ P_2(\omega) & -R_2(\omega) \end{vmatrix} = P_2(\omega)\,R_1(\omega) - P_1(\omega)\,R_2(\omega). \end{aligned}\right\} \quad (15.7)$$

Задаваясь различными значениями ω от $-\infty$ до $+\infty$ и определяя при этом соответствующие значения определителей Δ, Δ_1 и Δ_2, можно определить по выражению (15.5) соответствующие значения μ и λ, воспроизведя, таким образом, всю кривую Д-разбиения.

При рассмотрении границы Д-разбиения в плоскости одного параметра кривая Д-разбиения была симметричной относительно оси абсцисс, поэтому достаточно было построить по точкам часть этой кривой, соответствующую значениям ω от 0 до $+\infty$. В данном же случае кривая Д-разбиения получается несимметричной, но так как противоположные по знаку точки $\omega = \omega_1$ и $\omega = -\omega_1$ здесь совпадают, то достаточно построить кривую только для значений ω от 0 до $+\infty$. Поскольку, однако, при отрицательных значениях ω кривая Д-разбиения пробегается второй раз, это обстоятельство следует учитывать при нанесении штриховки.

Другая особенность построения кривой Д-разбиения в плоскости двух параметров состоит в том, что при изменении ω главный определитель Δ может, проходя через нуль, изменить свой знак на противоположный. При этом может быть два случая:

1) $\Delta = 0$, Δ_1 и Δ_2 конечны и не равны нулю. При этом, согласно выражений (15.5), $\mu = \infty$ и $\lambda = \infty$;

2) $\Delta = 0$, $\Delta_1 = 0$ (или $\Delta_2 = 0$). При этом уравнения (15.4), отличаясь друг от друга лишь на постоянный множитель, совпадают и сводятся к одному уравнению, определяющему в плоскости рассматриваемых параметров μ и λ не точку, а прямую. Параметр λ в этом случае является линейной функцией μ, а прямые, выражающие подобную зависимость, принято называть особыми прямыми.

Для нахождения особых прямых необходимо определить все значения ω, при которых либо одновременно определители $\Delta = 0$ и $\Delta_1 = 0$ (или $\Delta_2 = 0$), либо эти же определители одновременно равны ∞. Такими значениями ω, в частности, являются $\omega = 0$ и $\omega = \infty$.

Уравнение особой прямой, соответствующей значению $\omega = 0$, проще всего определить, приравняв нулю свободный член характеристического уравнения, а уравнение особой прямой, соответствующей значению $\omega = \infty$, — приравняв нулю коэффициент при его старшем члене. Если при этом получается выражение вида $\text{const} = 0$, то это указывает на то, что искомая особая прямая проходит на бесконечности и, конечно, практического интереса не представляет. В противном случае найденную прямую следует нанести на плоскости рассматриваемых параметров μ и λ.

Если одновременно определители $\Delta = 0$ и $\Delta_1 = 0$ (или $\Delta_2 = 0$) при значениях ω, отличных от нуля и бесконечности, то, подставив каждое из этих значений ω в уравнения (15.4), получим уравнение

прямой, которую также следует нанести на плоскости параметров μ и λ.

Итак, из изложенного следует, что граница Д-разбиения в плоскости двух параметров μ и λ в общем случае состоит из кривой Д-разбиения, построенной по точкам путем изменения значений ω от 0 до $+\infty$, и особых прямых.

После того как граница построена, необходимо нанести на ней штриховку для последующего определения областей, претендующих на область устойчивости в плоскости рассматриваемых параметров.

ШТРИХОВКА ГРАНИЦЫ Д-РАЗБИЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ДВУХ ПАРАМЕТРОВ И ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ

Из изложенного выше ясно, что каждой точке кривой Д-разбиения соответствуют вполне определенные значения ω и Δ. Изменение знака Δ соответствует изменению знака одной оси плоскости рассматриваемых параметров μ или λ. В соответствии с этим знак главного определителя Δ обусловливает направление штриховки.

При изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ кривая Д-разбиения штрихуется слева, если $\Delta > 0$, и справа, если $\Delta < 0$. Так как при изменении знака ω главный определитель также меняет свой знак, то при двухкратном обходе кривой Д-разбиения она оказывается два раза заштрихованной с одной и той же стороны.

Знак главного определителя Δ меняется только при значениях $\omega = \pm\infty$ или при тех значениях ω, которым соответствуют особые прямые. Поэтому практически, т. е. при конечных значениях ω, направление штриховки кривой Д-разбиения изменяется только в тех точках плоскости μ, λ, в которых кривая пересекается с особыми прямыми.

После нанесения штриховки кривой Д-разбиения должны быть заштрихованы особые прямые. Они штрихуются одинарной штриховкой, направление которой увязывается с направлением штриховки кривой Д-разбиения в точке ω, для которой построена особая прямая. Так, особую прямую, соответствующую значению $\omega = 0$ или $\omega = \infty$, следует штриховать так, чтобы вблизи этой точки прямая и кривая по одну ее сторону были обращены друг к другу заштрихованными сторонами, а по другую сторону от этой точки — незаштрихованными сторонами (рис. 15-9, *а*). Далее направление штриховки особой прямой не меняется независимо от того, пересекает ли она где-либо еще кривую или другие особые прямые или не пересекает.

Если кривая и особая прямая пересекаются на бесконечности ($\omega = \infty$), то особую прямую следует заштриховать так, чтобы вблизи точки $\omega = \infty$ кривая и прямая были бы направлены друг к другу только заштрихованными (рис. 15-9, *б*) или незаштрихованными сторонами.

Если же особая прямая пересекает кривую в точке, соответствующей значению ω, при котором одновременно определители $\Delta = 0$ и $\Delta_1 = 0$, то особая прямая штрихуется двойной штриховкой с учетом того, что при изменении знака главного определителя направление штриховки кривой меняется.

В том же редко встречающемся случае, когда граница Д-разбиения состоит из одних лишь особых прямых, штриховка последних выполняется с помощью приемов, рассматриваемых в специальной литературе [15-1].

После построения кривой Д-разбиения и всех особых прямых, а также нанесения штриховки можно перейти к разметке областей. Правила разметки те же, что и в случае Д-разбиения плоскости по

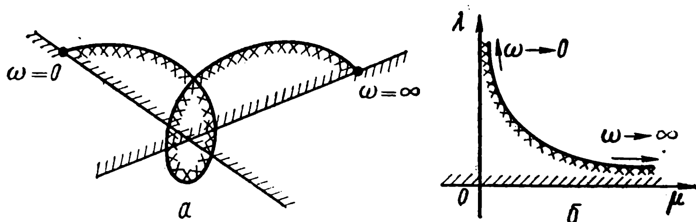


Рис. 15-9. Иллюстрация правила штриховки особых прямых.

одному параметру и не составляют труда, если известно, сколько отрицательных корней, т. е. корней слева от мнимой оси плоскости корней, имеет характеристическое уравнение в какой-либо точке плоскости рассматриваемых параметров μ и λ.

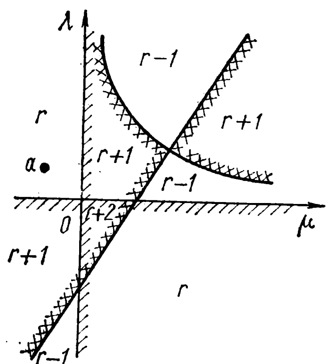


Рис. 15-10. К разметке областей.

Пусть, например, такой точкой в плоскости параметров является точка a (рис. 15-10) с координатами $\mu = -1$, $\lambda = 1$ и при этих значениях параметров μ и λ характеристическое уравнение имеет вид

$$a_0p^n + a_1p^{n-1} + a_2p^{n-2} + \cdots + a_{n-1}p + a_n = 0. \tag{15.8}$$

Число корней отрицательных можно определить, зная число положительных, т. е. корней, расположенных справа от оси мнимых величин плоскости корней. Число же последних можно определить по известной матрице Рауса [15-2], составленной из коэффициентов характеристического уравнения:

$$\left\| \begin{matrix} a_0 & a_2 & a_4 & \dots \\ a_1 & a_3 & a_5 & \dots \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots \\ a_{(n+1)1} & a_{(n+1)2} & a_{(n+1)3} & \end{matrix} \right\|. \tag{15.9}$$

Матрица Рауса (15.9) прямоугольная и состоит из $n + 1$ строк. В первой строке записываются все коэффициенты характеристического

уравнения (15.8) с четными индексами, включая нулевой. Во второй строке записываются коэффициенты с нечетными индексами. В третьей строке записываются элементы, полученные в соответствии с приведенным на рис. 15-11 правилом, т. е. путем перекрестного умножения элементов первых двух строк с последующим делением на первый элемент предыдущей строки. При этом получаем

$$\left.\begin{aligned} a_{31} &= \frac{a_1 a_2 - a_3 a_0}{a_1}; \\ a_{32} &= \frac{a_3 a_4 - a_5 a_2}{a_3}; \\ a_{41} &= \frac{a_{31} a_3 - a_{32} a_1}{a_{31}} \end{aligned}\right\} \tag{15.10}$$

и т. д.

Число положительных корней в уравнении (15.8) определяется числом перемен знака у элементов первого (левого) столбца матрицы Рауса (15.9). Зная число положительных корней, определяем число r отрицательных корней в точке a (рис. 15-10) и приступаем к разметке областей.

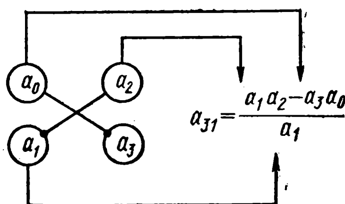


Рис. 15-11. Иллюстрация правила получения элементов третьей строки матрицы Рауса.

При переходе из точки a, расположенной в области с отметкой r, через особую прямую $\mu = 0$ с незаштрихованной ее стороны на заштрихованную число отрицательных корней увеличивается на единицу. Поэтому соответствующую область размечаем отметкой $r + 1$. Далее, при переходе через кривую Д-разбиения с дважды заштрихованной стороны на незаштрихованную попадаем в область, которую должны обозначить отметкой $r - 1$. При переходе через дважды заштрихованную особую прямую с незаштрихованной ее стороны на заштрихованную попадаем в область, которую размечаем как область с отметкой $r + 1$. Аналогично поступаем и дальше, получая в конечном счете область с отметкой $r + 2$.

Если число $r + 2 = n$, где n — степень характеристического уравнения (15.8), то эта область является областью устойчивости. Если же $r + 2 < n$, то ни одна из областей не является областью устойчивости.

Пример 2. *Дано:* характеристическое уравнение

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0.$$

Значения его коэффициентов следующие:

$$a_0 = T_1 T_2 T_3;$$

$$a_1 = T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_3 T_1;$$

$$a_2 = T_1 + T_2 + T_3;$$

$$a_3 = K_1 K_2 K_3 + 1 = K_{1-3} + 1 = K.$$

Тогда характеристическое уравнение можно записать в виде

$$T_1T_2T_3p^3+(T_1T_2+T_2T_3+T_3T_1)\,p^2+(T_1+T_2+T_3)\,p+K=0.$$

Требуется: построить Д-разбиение плоскости двух параметров T_1 и K и определить области устойчивости при следующих значениях параметров T_2 и T_3 системы*: $T_2=0{,}76$ с; $T_3=9{,}9$ с.

Решение. Подставляя значения T_2 и T_3 и вводя обозначения $T_1=\mu$ и $K=\lambda$, получаем характеристическое уравнение

$$\mu\cdot 0{,}76\cdot 9{,}9p^3+(\mu\cdot 0{,}76+0{,}76\cdot 9{,}9+9{,}9\mu)p^2+(\mu+0{,}76+9{,}9)\,p+\lambda=0,$$

или

$$7{,}52\mu p^3+(10{,}66\mu+7{,}52)\,p^2+(\mu+10{,}66)\,p+\lambda=0. \qquad (15.11)$$

Произведя замену p на $j\omega$, находим

$$-7{,}52\mu j\omega^3-(10{,}66\mu+7{,}52)\,\omega^2+(\mu+10{,}66)\,j\omega+\lambda=0.$$

Приравнивая нулю порознь действительную и мнимую части, получаем

$$g(\omega)=-10{,}66\mu\omega^2-7{,}52\omega^2+\lambda=0;$$
$$h(\omega)=-7{,}52\mu\omega^3+\mu\omega+10{,}66\omega=0,$$

или, представляя эти уравнения в виде выражений (15.4), т. е. через полиномы $P_1(\omega)$ и $P_2(\omega)$ при множителях μ и через полиномы $Q_1(\omega)$ и $Q_2(\omega)$ при множителях λ, а также через полиномы $R_1(\omega)$ и $R_2(\omega)$, не содержащие множителей μ и λ, с учетом

$$P_1(\omega)=-10{,}66\omega^2;\quad Q_1(\omega)=1;\quad R_1(\omega)=-7{,}52\omega^2;$$
$$P_2(\omega)=-7{,}52\omega^3+\omega;\quad Q_2(\omega)=0;\quad R_2(\omega)=10{,}66\,(\omega),$$

получаем

$$\left.\begin{aligned} g(\omega)&=-10{,}66\omega^2\mu+\lambda-7{,}52\omega^2=0;\\ h(\omega)&=(-7{,}52\omega^3)\,\mu+0\cdot\lambda+10{,}66\omega=0.\end{aligned}\right\} \qquad (15.12)$$

Решая систему уравнений (15.12) по формуле (15.5), получаем

$$\mu=\frac{\Delta_1}{\Delta}\ \text{и}\ \lambda=\frac{\Delta_2}{\Delta},$$

где главный определитель по выражению (15.6)

$$\Delta=P_1(\omega)\,Q_2(\omega)-P_2(\omega)\,Q_1(\omega)=-10{,}66\omega^2\cdot 0-(-7{,}52\omega^3+\omega)\cdot 1=$$
$$=7{,}52\omega^3-\omega=(7{,}52\omega^2-1)\,\omega.$$

Остальные определители по выражению (15.7)

$$\Delta_1=R_2(\omega)\,Q_1(\omega)-R_1(\omega)\,Q_2(\omega)=10{,}66\omega\cdot 1-(-7{,}52\omega^3+\omega)\cdot 0=10{,}66\omega;$$
$$\Delta_2=P_2(\omega)\,R_1(\omega)-P_1(\omega)\,R_2(\omega)=(-7{,}52\omega^3+\omega)(-7{,}52\omega^2)-$$
$$-(-10{,}66\omega^2)\,10{,}66\omega=56{,}6\omega^5-7{,}52\omega^3+113{,}63\omega^3=(56{,}6\omega^2+105{,}12)\,\omega^3.$$

Задаваясь теперь значениями ω от 0 до $+\infty$, получаем значения параметров μ и λ, сведенные в табл. 10. По данным этой таблицы на рис. 15-12 построены кривые зависимости $\lambda=f(\mu)$. По условиям принятого масштаба данные таблицы по позициям 6—8 и 17—19 использованы не были. При $\omega=0$ определители $\Delta=\Delta_1=0$.

Особую прямую для $\omega=\infty$ получим, приравняв нулю свободный член характеристического уравнения, т. е. $\lambda=0$. Это будет прямая, совпадающая с осью абсцисс μ.

---

* См. пример 4 в гл. 14.

Номер позиции	ω	ω^2	ω^3	$\Delta=(7{,}52\omega^2-1)\omega$	$\Delta_1=10{,}66\omega$	$\Delta_2=(56{,}6\omega^2+105{,}12)\omega^3$	$\mu=\frac{\Delta_1}{\Delta}$	$\lambda=\frac{\Delta_2}{\Delta}$
1	0	0	0	0	0	0	—10,66	0
2	0,1	0,01	0,001	—0,0925	1,066	0,1057	—11,52	—1,14
3	0,2	0,04	0,008	—0,14	2,132	0,859	—15,21	—6,14
4	0,25	0,0625	0,0156	—0,1325	2,665	1,695	—20,11	—12,8
5	0,3	0,09	0,027	—0,097	3,2	2,98	—33	—30,7
6	0,36	0,13	0,047	—0,008	3,84	5,29	—480	—661
7	0,3645	0,133	0,048	0	3,885	5,26	∞	∞
8	0,365	0,133	0,049	0,0006	3,89	5,145	6483	8575
9	0,4	0,16	0,064	0,08	4,264	7,307	53,3	91,3
10	0,45	0,203	0,091	0,238	4,8	10,6	20,1	44,5
11	0,5	0,25	0,125	0,44	5,33	14,9	12,1	34
12	0,6	0,36	0,216	1,024	6,396	27,1	6,24	26,4
13	0,75	0,563	0,422	2,43	7,99	57,8	3,3	23,8
14	1,5	2,25	3,375	23,9	16,0	785	0,67	32,9
15	2	4	8	58,6	21,32	2652	0,366	45,6
16	3	9	27	200	32,0	16592	0,16	82,9
17	4	16	64	477	42,6	64686	0,089	135
18	10	100	1000	7510	106,6	5 765 000	0,0142	767
19	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	∞

Особую прямую для $\omega=0$ получим, приравняв нулю зависящий от μ коэффициент при старшем члене характеристического уравнения, т. е. $7{,}52\,\mu=0$ или $\mu=0$. Это будет прямая, совпадающая с осью ординат λ.

Границей Д-разбиения, таким образом, является построенная на рис. 15-12 кривая и оси координат μ и λ.

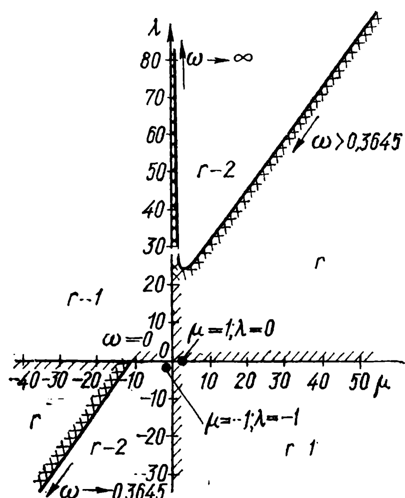


Рис. 15-12. Граница Д-разбиения (кривая и оси координат μ и λ).

Заметим, что главный определитель Δ обращается в нуль также и при $\omega\neq 0$. Действительно, выше для него было получено выражение

$$\Delta=(7{,}52\omega^2-1)\,\omega.$$

Приравнивая нулю значение в скобках, получаем

$$7{,}52\omega^2-1=0,$$

откуда

$$\omega=\sqrt{\frac{1}{7{,}52}}=0{,}3645.$$

Параметры μ и λ принимают при этом значения $\mu=\infty$ и $\lambda=\infty$ (табл. 10). При $0<\omega<0{,}3645$ значение главного определителя $\Delta<0$, а при $\omega>0{,}3645$ значение $\Delta>0$.

Теперь, пользуясь изложенными выше правилами, нанесем штриховку кривой Д-разбиения. Двигаясь вдоль кривой от точки $\omega=0$ к точке $\omega=0{,}3645$, т. е. на участке, где $\Delta<0$, наносим двойную штриховку справа, а затем, двигаясь вдоль кривой при $\omega>0{,}3645$, т. е. на участке, где $\Delta>0$, наносим двойную штриховку слева от этой кривой.

Далее нанесем штриховку особых прямых. Первой наносим штриховку прямой $\lambda=0$, т. е. оси абсцисс, начиная с точки $\omega=0$. Вблизи этой точки штрихуем

прямую так, чтобы по одну ее сторону кривая Д-разбиения и эта прямая были обращены друг к другу заштрихованными сторонами, а по другую — незаштрихованными. Такую штриховку продолжаем до конца прямой $\lambda = 0$, несмотря на то, что она пересекает другую особую прямую $\mu = 0$, т. е. ось ординат в данном случае.

Особую прямую $\mu = 0$ также штрихуем так, чтобы эта прямая и кривая Д-разбиения были обращены друг к другу заштрихованными сторонами. Продолжаем эту штриховку также до конца прямой, несмотря на то, что она пересекает другую особую прямую $\lambda = 0$, т. е. ось абсцисс.

Покончив со штриховкой, переходим к разметке областей. В общем случае для этого в уравнение (15.11) следует подставить координаты какой-либо точки плоскости μ, λ, например $\mu = -1$ и $\lambda = -1$. При этом уравнение (15.11) принимает вид

$$-7{,}52p^3 - 3{,}14p^2 + 9{,}66p - 1 = 0,$$

а элементы матрицы Рауса (15.9) принимают следующие значения:

$$a_0 = -7{,}52; \qquad a_2 = 9{,}66;$$

$$a_1 = -3{,}14; \qquad a_3 = -1;$$

$$a_{31} = \frac{a_1 a_2 - a_3 a_0}{a_1} = \frac{-3{,}14 \cdot 9{,}66 - (-1)(-7{,}52)}{-3{,}14} = \frac{-30{,}3 - 7{,}52}{-3{,}14} = 12;$$

$$a_{32} = \frac{a_3 a_4 - a_5 a_2}{a_3} = \frac{-1 \cdot 0{,}0 - 0{,}0 \cdot 9{,}66}{-1} = 0;$$

$$a_{41} = \frac{a_{31} a_3 - a_{32} a_1}{a_{31}} = \frac{12(-1) - 0{,}0(-3{,}14)}{12} = -1; \qquad a_{42} = 0;$$

$$a_{51} = \frac{a_{41} a_{32} - a_{42} a_{31}}{a_{41}} = \frac{-1 \cdot 0{,}0 - 0{,}0 \;\; 12}{-1} = 0; \qquad a_{52} = 0.$$

Во-первых, не все коэффициенты первого столбца положительны, поэтому система регулирования при параметрах $\mu = -1$ и $\lambda = -1$ является неустойчивой. Во-вторых, поскольку в первом столбце матрицы знак меняется два раза, в правой половине плоскости корней, т. е. справа от мнимой оси ее, находятся два корня из трех возможных. Следовательно, область, в которой находится точка с координатами $\mu = -1$ и $\lambda = -1$ плоскости параметров, должна быть помечена отметкой $r - 2$.

Поскольку в рассматриваемом случае уравнение (15.11) третьей степени, определить отметку какой-либо области плоскости μ, λ (рис. 15-12) можно и более простым путем, не прибегая к матрице Рауса. Для этого, в соответствии с видом уравнения (15.11), удобно выбрать точку на плоскости (рис. 15-12) с координатами $\lambda = 0$ и $\mu = 1$. При этом уравнение (15.11) будет иметь вид

$$7{,}52p^3 + (10{,}66 + 7{,}52)\,p^2 + (1 + 10{,}66)\,p = 0,$$

или

$$7{,}52p^3 + 18{,}18p^2 + 11{,}66p = 0,$$

или

$$(7{,}52p^2 + 18{,}18p + 11{,}66)\,p = 0. \qquad (15.13)$$

Корни уравнения (15.13)

$$p_1 = 0; \quad p_{2,3} = \frac{-18{,}18 \pm \sqrt{18{,}18^2 - 4 \cdot 11{,}66 \cdot 7{,}52}}{2 \cdot 7{,}52} < 0.$$

Следовательно, из трех корней уравнения (15.13) два — p_2 и p_3 — расположены слева от оси мнимых величин плоскости корней, а корень $p_1 = 0$ расположен на этой оси, т. е. точка $\mu = 1$, $\lambda = 0$, лежащая в плоскости параметров на особой прямой $\lambda = 0$ (рис. 15-12), принадлежит к области, которой в плоскости корней соответствуют два отрицательных корня. Поэтому, исходя из обозначения максимально возможного числа отрицательных корней через r, область, в которую попадаем из точки $\mu = 1$, $\lambda = 0$, сходя с прямой в незаштрихованную сторону, сле-

дует пометить отметкой $r-1$, где цифра 1 указывает, что этой области соответствует один положительный корень.

Область, в которую попадаем далее, переходя заштрихованную особую прямую из заштрихованной части в незаштрихованную, будет областью с пометкой $r-2$, т. е. меньшей на единицу. Пометка этой области была получена также раньше при помощи матрицы Рауса.

Переходя из этой области через дважды заштрихованную прямую из незаштрихованной стороны на заштрихованную, попадаем в область с отметкой r. Переходя через особую прямую $\lambda=0$ с заштрихованной стороны на незаштрихованную, попадаем в область с отметкой $r-1$, а переходя далее особую прямую $\mu=0$ из незаштрихованной ее стороны на заштрихованную, попадаем в область с отметкой r.

Затем, переходя из области с пометкой r через кривую Д-разбиения с дважды заштрихованной ее стороны на незаштрихованную, попадаем в область с отметкой $r-2$.

Таким образом, все области размечены. Претендующими на область устойчивости оказались две области с наибольшей отметкой r с числом отрицательных корней $r=3=n$. Но, поскольку область с параметрами $\lambda<0$ и $\mu<0$ реального смысла не имеет, областью устойчивости является лишь одна область с отметкой r, в которой эти параметры положительны, т. е. $\lambda>0$ и $\mu>0$. Эта область показана на рис. 15-13.

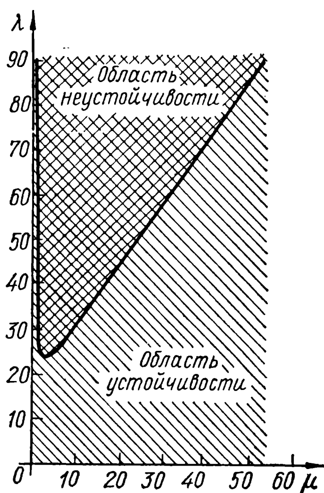


Рис. 15-13. Реальная область устойчивости (при положительных параметрах μ и λ).

Глава шестнадцатая

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При рассмотрении условий устойчивости получаем лишь ответ на вопрос, устойчива ли система регулирования или же неустойчива. Характер протекания переходного процесса при этом не рассматривается. А между тем для нормальной работы системы автоматического регулирования недостаточно одного наличия устойчивости, необходимо еще знать, не слишком ли медленно идет затухание колебаний и не превышается ли при этом допустимый предел отклонения регулируемой величины, т. е. необходимо еще знать качество переходного процесса.

Получение же ответа о качестве переходного процесса связано с трудоемким процессом построения интегральной кривой путем интегрирования дифференциального уравнения системы регулирования с вычислением произвольных постоянных. Поэтому для линейных систем автоматического регулирования наряду с классическими методами решения дифференциальных уравнений все чаще начинает применяться известное преобразование Лапласа, позволяющее с самого начала учесть начальные условия и этим обойти сложные выкладки, связанные с вычислением постоянных интегрирования.

Сущность преобразования Лапласа, производимого над некоторой функцией $f(t)$ независимой вещественной переменной t, заключается в умножении этой функции на величину e^{-pt} и взятии интеграла в пределах от нуля до плюс бесконечности, т. е.

$$L[f(t)] = \int_0^\infty f(t)\, e^{-pt} dt, \qquad (16.1)$$

где p — некоторое число, в общем случае комплексное;

t — время, которое в данном преобразовании рассматривается как величина положительная, т. е. $t > 0$.

Таблица 11

Преобразования Лапласа для некоторых функций

$f(t)$ (оригинал)	График функции $f(t)$	$L[f(t)]$ (изображение)	Интерпретация изображения (расположение полюсов и нулей)
$e^{\mp\alpha t}$	$e^{-\alpha t}$; $e^{-\alpha t}$; 0; t	$\frac{1}{p\pm\alpha}$	$e^{-\alpha t}$; $+j$; $-\alpha$; 0; $+$
$\sin\omega t$	0; t	$\frac{\omega}{p^2+\omega^2}$	$+j\omega t$; $-j\omega t$; $+j$; 0; $+$
$\cos\omega t$	0; t	$\frac{p}{p^2+\omega^2}$	$+j\omega t$; $-j\omega t$; $+j$; $S=0$; $+$
$e^{-\alpha t}\sin\omega t$	$e^{-\alpha t}$; 0; t	$\frac{\omega}{(p+\alpha)^2+\omega^2}$	$-\alpha+j\omega$; $-\alpha-j\omega$; $+j$; 0; $+$
$e^{-\alpha t}\cos\omega t$	$e^{-\alpha t}$; 0; t	$\frac{p+\alpha}{(p+\alpha)^2+\omega^2}$	$-\alpha+j\omega$; $-\alpha$; $-\alpha-j\omega$; $+j$; 0; $+$
[1]	0; t	$\frac{1}{p}$	$+j$; 0; $+$; Полюс 1-го порядка
t	0; t	$\frac{1}{p^2}$	$+j$; 0; $+$; Полюс 2-го порядка
t^2	t	$\frac{2}{p^3}$	$+j$; 0; $+$; Полюс 3-го порядка

То обстоятельство, что функция $f(t)$ рассматривается лишь при значениях времени $t > 0$, является важным, поскольку в условиях автоматического регулирования обычно интересуют значения этой функции именно после приложения к системе возмущающих воздействий в момент времени $t = 0$.

Функция $f(t)$ в выражении (16.1) называется *оригиналом*, а функция $L[f(t)]$ называется преобразованием Лапласа функции $f(t)$ или ее *изображением*. Если не считать некоторых ограничений, излагаемых в курсах преобразования Лапласа*, то можно сказать, что всякому оригиналу $f(t)$ ссответствует свое изображение $L[f(t)]$. Наряду с прямым преобразованием оригинала в изображение пользуются и обратным преобразованием изображения в оригинал. Примеры преобразования Лапласа для простейших функций приведены в литературе [16-1].

Кроме того, имеются [16-2] таблицы функций и соответствующих им изображений. Пользуясь этими таблицами, можно найти без всяких вычислений как оригинал $f(t)$, соответствующий заданному изображению $L[f(t)]$, так и изображение $L[f(t)]$, соответствующее заданному оригиналу $f(t)$.

В табл. 11 приведены преобразования Лапласа для функций, наиболее часто встречающихся при рассмотрении вопросов автоматического регулирования. В первой графе таблицы приведены рассматриваемые функции, во второй — их графики изменения во времени. В третьей графе приведены изображения, а в четвертой — интерпретация этих изображений на комплексной плоскости (расположение полюсов и нулей).

В табл. 12 приведены преобразования Лапласа для некоторых математических операций, которые потребуется выполнить несколько ниже.

Таблица 12

$f(t)$ (оригинал)	$L[f(t)]$ (изображение)
$af(t)$	$aL[f(t)]$
$f_1(t) \pm f_2(t)$	$L[f_1(t)] \pm L[f_2(t)]$
$\frac{df(t)}{dt}$	$pL[f(t)] - f(0)$
$\frac{d^2f(t)}{dt^2}$	$p^2L[f(t)] - [pf(0) + f'(0)]$
$\frac{d^nf(t)}{dt^n}$	$p^nL[f(t)] - [p^{n-1}f(0) + p^{n-2}f'(0) + p^{n-3}f''(0)\ldots]$ (число слагаемых во второй скобке равно n)

* Для задач авторегулирования электрических машин эти ограничения считаются [16-3] несущественными.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Пусть система автоматического регулирования описывается дифференциальным уравнением

$$a_0x^{(n)} + a_1x^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}x' + a_nx = f(t). \qquad (16.2)$$

Принимается, что входная (возмущающая) функция $f(t)$ в любой момент является величиной постоянной, а до момента возникновения возмущения процесс регулирования был установившимся, т. е. $x_0 = \text{const}$. В момент возникновения возмущения ($t = 0$) выходная величина x_0 не может измениться скачком, поскольку при этом предпоследний член в левой части уравнения, содержащий первую производную $x' = \frac{dx}{dt}$, принял бы бесконечно большое значение, тогда как правая часть дифференциального уравнения является конечной величиной. Следовательно, в начальный момент времени (при $t = 0$) выходная величина $x(0) = x_0$.

Не может измениться скачком и первая производная от выходной величины $\frac{dx}{dt}$, поскольку при этом третий член в левой части уравнения, содержащий вторую производную $x'' = \frac{d^2x}{dt^2}$, принял бы бесконечно большое значение, тогда как первая часть уравнения является конечной величиной. Следовательно, в начальный момент времени (при $t = 0$) первая производная $x'(0) = 0$.

По той же причине получим

$$x''(0) = 0;$$

$$\cdots\cdots\cdots$$

$$\cdots\cdots\cdots$$

$$x^{(n-1)}(0) = 0.$$

Следовательно, при $t = 0$ скачком будет изменяться только старшая производная $x^{(n)} = \frac{d^nx}{dt^n}$, принимающая при этом значение

$$x^{(n)}(0) = \frac{f(0) - a_nx(0)}{a_0}. \qquad (16.3)$$

Если до момента возмущения система находилась в покое, т. е. при $t < 0$ величина $x(0) = 0$, то в этом случае при $t = 0$ будем иметь

$$x(0) = x'(0) = x''(0) = \cdots = x^{(n-1)}(0) = 0.$$

При этом уравнение (16.2) принимает вид

$$a_0x^{(n)}(0) = f(0),$$

откуда

$$x^{(n)}(0) = \frac{f(0)}{a_0}, \qquad (16.4)$$

т. е. старшая производная равна начальному возмущению, деленному на коэффициент при старшей производной.

Рассмотрим в общем виде дифференциальное уравнение, имеющее правую часть,

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dx}{dt} + a_n x = f(t). \qquad (16.5)$$

Умножая это уравнение на e^{-pt} и интегрируя в пределах от 0 до ∞, получим изображение

$$\int_0^\infty \left[a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \cdots + a_n x\right] e^{-pt} dt = \int_0^\infty f(t)\, e^{-pt} dt,$$

или

$$a_0 \int_0^\infty \frac{d^n x}{dt^n} e^{-pt}\, dt + a_1 \int_0^\infty \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} e^{-pt} dt + \cdots + a_n \int_0^\infty x e^{-pt} dt = \int_0^\infty f(t)\, e^{-pt} dt,$$

что можно переписать в виде

$$a_0 L\left[\frac{d^n x}{dt^n}\right] + a_1 L\left[\frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}}\right] + \cdots + a_n L[x] = L[f(t)].$$

Заменим изображения производных по формулам, приведенным в табл. 12, вводя соответствующие начальные условия:

$$\begin{aligned} & a_0 p^n L[x] - a_0 [p^{n-1} x_0 + p^{n-2} x_0' + \cdots] + \\ & + a_1 p^{n-1} L[x] - a_1 [p^{n-2} x_0 + p^{n-3} x_0' + \cdots] + \cdots \\ & \cdots + a_n L[x] = L[f(t)], \end{aligned} \qquad (16.6)$$

т. е. вместо дифференциального уравнения получено соответствующее ему алгебраическое уравнение.

Далее все члены, содержащие начальные условия, перенесем в правую часть и обозначим полученный из них полином через $R(p)$. Тогда

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \cdots + a_n) L[x] = L[f(t)] + R(p). \qquad (16.7)$$

Раскрывая в выражении (16.6) скобки и приводя подобные члены, получим с учетом (16.7)

$$R(p) = b_{n-1} p^{n-1} + b_{n-2} p^{n-2} + \cdots + b_1 p + b_0, \qquad (16.8)$$

где коэффициенты b зависят от начальных условий и соответственно равны:

$$\left.\begin{aligned} & b_{n-1} = a_0 x_0; \\ & b_{n-2} = a_0 x_0' + a_1 x_0; \\ & \cdots\cdots\cdots \\ & \cdots\cdots\cdots \\ & b_1 = a_0 x_0^{(n-2)} + a_1 x_0^{(n-3)} + \cdots + a_{n-2} x_0; \\ & b_0 = a_0 x_0^{(n-1)} + a_1 x_0^{(n-2)} + \cdots + a_{n-1} x_0. \end{aligned}\right\} \qquad (16.9)$$

Полином в скобках в левой части уравнения (16.7) аналогичен левой части характеристического уравнения. Обозначим его через

$$D(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + a_2p^{n-2} + \cdots + a_n. \qquad (16.10)$$

Тогда уравнение (16.7) принимает вид

$$D(p)\, L[x(t)] = L[f(t)] + R(p),$$

или

$$L[x(t)] = \frac{L[f(t)]}{D(p)} + \frac{R(p)}{D(p)}, \qquad (16.11)$$

где первое слагаемое определяет движение системы под воздействием возмущения $f(t)$, а второе — определяет свободные движения с учетом начальных условий.

Уравнение (16.11) представляет собой изображение по Лапласу функции $x(t)$. Дальше надо по изображению (16.11) найти оригинал или интеграл дифференциального уравнения (16.5), т. е. надо перейти от полученного изображения к оригиналу.

Для этого поступают следующим образом. Путем выбора начальных условий можно сделать $f(t) = 0$. При этом выражение (16.11) принимает вид

$$L[x(t)] = \frac{R(p)}{D(p)} = \frac{b_{n-1}p^{n-1} + b_{n-2}p^{n-2} + \cdots + b_0}{a_np^n + a_{n-1}p^{n-1} + \cdots + a_0}, \qquad (16.12)$$

что соответствует, как было сказано, переходному процессу, т. е. свободным движениям.

Если корни уравнения $D(p) = 0$ известны и среди них нет кратных корней, то выражение (16.12) можно [16-3] разложить на простые дроби

$$L[x(t)] = \frac{A_1}{p - p_1} + \frac{A_2}{p - p_2} + \cdots + \frac{A_k}{p - p_k} + \cdots + \frac{A_n}{p - p_n} = \frac{R(p)}{D(p)}, \qquad (16.13)$$

где $p_1, p_2, p_3, \ldots, p_n$ — корни характеристического уравнения $D(p) = 0$;

$A_1, A_2\ A_3, \cdots, A_n$ — коэффициенты (числители) дробей.

Для определения этих коэффициентов можно вывести формулу. Для этого правую и левую части уравнения (16.13) умножим на $(p - p_k)$, где p_k — любой из корней уравнения $D(p) = 0$, т. е.

$$\frac{p - p_k}{p - p_1}A_1 + \frac{p - p_k}{p - p_2}A_2 + \cdots + A_k + \cdots + \frac{p - p_k}{p - p_n}A_n = \frac{p - p_k}{D(p)}R(p).$$

Положив в этом уравнении $p = p_k$, получим в левой части его только слагаемое A_k, отличное от нуля, а в правой части дробь $\frac{p - p_k}{D(p)}$ при $p = p_k$ превращается в неопределенность вида $\frac{0}{0}$ (поскольку полином характеристического уравнения $D(p)$ равен нулю). Раскрывая эту неопределенность по правилу Лопиталя, получим

$$\lim_{p \to p_k} \frac{p - p_k}{D(p)} = \lim_{p \to p_k} \frac{(p - p_k)'}{D'(p)} = \frac{1}{D'(p)}.$$

Следовательно, уравнение для определения любого коэффициента A_k будет

$$A_k = \frac{1}{D'(p_k)} R(p_k) = \frac{R(p_k)}{D'(p_k)}.$$

Тогда уравнение (16.13) перепишется в виде

$$L[x(t)] = \frac{R(p)}{D(p)} = \frac{R(p_1)}{D'(p_1)} \cdot \frac{1}{p - p_1} + \frac{R(p_2)}{D'(p_2)} \cdot \frac{1}{p - p_2} + \cdots + \\ + \frac{R(p_n)}{D'(p_n)} \cdot \frac{1}{p - p_n},$$

или

$$L[x(t)] = \sum_{k=1}^{n} \frac{R(p_k)}{D'(p_k)} \cdot \frac{1}{p - p_k}, \tag{16.14}$$

где $D'(p_k)$ — соответствующая производная от полинома (16.10) при $p = p_k$, т. е.

$$D'(p_k) = \frac{d}{dt}(a_0 p_k^n + a_1 p_k^{n-1} + \cdots + a_n).$$

Из табл. 11 следует, что изображению $\frac{1}{p - p_k}$ соответствует оригинал $e^{p_k t}$. Тогда уравнение переходного процесса (16.12) окончательно принимает вид

$$x(t) = \sum_{k=1}^{n} \frac{R(p_k)}{D'(p_k)} e^{p_k t}, \tag{16.15}$$

где $k = 1, 2, 3, \ldots, n$.

Для определения слагаемых суммы (16.15) удобно поступать следующим образом. С учетом (16.10) определить левую часть соответствующего характеристического уравнения, т. е.

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \cdots + a_n,$$

и при $D(p) = 0$ найти его корни $p_1, p_2, p_3, \ldots, p_n$. Взять производную $D'(p)$. Для полинома $R(p)$ по формулам (16.9) вычислить коэффициенты b.

Далее следует подставить в $R(p)$ и $D'(p)$ последовательно корни p_1, $p_2, p_3, \ldots, p_n$, определяя при этом значения дроби $\frac{R(p_k)}{D'(p_k)}$ для каждого из корней. Затем, умножая последовательно значения этих дробей на множитель $e^{p_k t}$, можно найти искомую функцию $x(t)$ как сумму соответствующих слагаемых при $k = 1, 2, 3, \ldots, n$.

Пример 1. *Дано:* дифференциальное уравнение системы регулирования

$$\frac{d^3x}{dt^3} + 9\frac{d^2x}{dt^2} + 23\frac{dx}{dt} + 14x = 0 \tag{16.16}$$

и начальные условия

$$t = 0;\ x = x_0;\ x' = x'' = 0.$$

Требуется: проинтегрировать дифференциальное уравнение (16.16) с помощью преобразования Лапласа.

Решение. Характеристическое уравнение имеет вид

$$D(p) = p^3 + 9p^2 + 23p + 14 = 0.$$

Его корни $p_1 = -0{,}9$; $p_2 = -4{,}9$; $p_3 = -3{,}3$.

Производная от $D(p)$

$$D'(p) = 3p^2 + 18p + 23.$$

По формулам (16.9) определяем коэффициенты полинома (16.8), который в данном случае имеет вид

$$R(p) = b_2p^2 + b_1p + b_0;$$
$$b_{n-1} = b_2 = a_0x_0 = 1 \cdot x_0;$$
$$b_{n-2} = b_1 = a_0x_0' + a_1x_0 = 9x_0;$$
$$b_{n-3} = b_0 = a_0x_0'' + a_1x_0' + a_2x_0 = 23x_0.$$

Следовательно, полином

$$R(p) = x_0p^2 + 9x_0p + 23x_0.$$

По (16.12) изображение функции будет

$$L[x(t)] = \frac{R(p)}{D(p)} = \frac{x_0p^2 + 9x_0p + 23x_0}{p^3 + 9p^2 + 23p + 14},$$

а оригинал функции по (16.15)

$$x(t) = \sum_{k=1}^{n} \frac{R(p_k)}{D'(p_k)} e^{p_kt} = \frac{x_0(0{,}81 - 8{,}1 + 23)}{2{,}43 - 16{,}2 + 23} e^{-0{,}9t} +$$
$$+ \frac{x_0(24 - 44 + 23)}{72 - 88 + 23} e^{-4{,}9t} + \frac{x_0(10{,}9 - 29{,}7 + 23)}{32{,}7 - 59{,}4 + 23} e^{-3{,}3t} =$$
$$= 1{,}7x_0e^{-0{,}9t} + 0{,}43x_0e^{-4{,}9t} - 1{,}13x_0e^{-3{,}3t}.$$

Это и есть искомый интеграл дифференциального уравнения (16.16).

В момент времени $t = 0$ получим значение функции при нулевых условиях:

$$x(0) = (1{,}7 + 0{,}43 - 1{,}13)\,x_0 = x_0,$$

чем подтверждается правильность проведенных вычислений.

ИНТЕГРИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ КОМПЛЕКСНЫХ КОРНЕЙ

Если характеристическое уравнение содержит не только вещественные, как в разобранном числовом примере, но и сопряженно-комплексные корни

$$p_k = \alpha + j\beta \text{ и } p_{k+1} = \alpha - j\beta,$$

то в этом случае в выражении (16.15) будут и относящиеся к этим корням комплексные слагаемые

$$\frac{R(p_k)}{D'(p_k)} = \delta + j\omega \text{ и } \frac{R(p_{k+1})}{D'(p_{k+1})} = \delta - j\omega, \qquad (16.17)$$

В векторной форме эти слагаемые запишутся так:

$$\frac{R(p_k)}{D'(p_k)} = Ae^{j\varphi} \quad \text{и} \quad \frac{R(p_{k+1})}{D'(p_{k+1})} = Ae^{-j\varphi}, \tag{16.18}$$

где амплитуда $A = \sqrt{\delta^2 + \omega^2}$ и фаза

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{\omega}{\delta}.$$

Тогда в составе суммы (16.15) будут слагаемые

$$Ae^{j\varphi}e^{(\alpha+j\beta)t} + Ae^{-j\varphi}e^{(\alpha-j\beta)t} = Ae^{\alpha t}[e^{j(\beta t+\varphi)} + e^{-j(\beta t+\varphi)}] = 2Ae^{\alpha t}\cos(\beta t + \varphi). \tag{16.19}$$

Пример 2. *Дано:* дифференциальное уравнение системы регулирования [16-5]

$$3{,}76\frac{d^3x}{dt^3} + 12{,}83\frac{d^2x}{dt^2} + 11{,}16\frac{dx}{dt} + 11x = 0. \tag{16.20}$$

До момента возмущения система регулирования работала в установившемся режиме, т. е. начальные условия:

$$t = 0;\ x = x_0 = \text{const};\ x' = x'' = 0.$$

Требуется: проинтегрировать дифференциальное уравнение (16.20) с помощью преобразования Лапласа.

Решение. Характеристическое уравнение системы

$$D(p) = 3{,}76p^3 + 12{,}83p^2 + 11{,}16p + 11 = 0,$$

решение которого (по формулам Кардана [16-4]) дает корни, в числе которых два сопряженно-комплексных, т. е.

$$p_1 = -2{,}714;$$
$$p_2 = -0{,}3485 + j0{,}9783;$$
$$p_3 = -0{,}3485 - j0{,}9783.$$

Для полинома (16.8) находим по (16.9) значения коэффициентов b:

$$b_{n-1} = b_2 = a_0x_0 = 3{,}76x_0;$$
$$b_{n-2} = b_1 = a_0x_0' + a_1x_0 = 12{,}83x_0;$$
$$b_{n-3} = b_0 = a_0x_0'' + a_1x_0' + a_2x_0 = 11{,}16x_0.$$

Тогда полином (16.8) принимает вид

$$R(p) = 3{,}76x_0p^2 + 12{,}83x_0p + 11{,}16x_0. \tag{16.21}$$

Полином (16.10)

$$D(p) = 3{,}76p^3 + 12{,}83p^2 + 11{,}16p + 11,$$

а его производная

$$D'(p) = 3 \cdot 3{,}76p^2 + 2 \cdot 12{,}83p + 11{,}16 = 11{,}28p^2 + 25{,}66p + 11{,}16. \tag{16.22}$$

По (16.12) найдем изображение $L[x(t)]$ для функции $x(t)$, т. е.

$$L[x(t)] = \frac{R(p)}{D(p)} =$$
$$= \frac{3{,}76x_0p^2 + 12{,}83x_0p + 11{,}16x_0}{3{,}76p^3 + 12{,}83p^2 + 11{,}16p + 11},$$

что, как было указано, соответствует переходному процессу.

Оригинал, т. е. функцию $x(t)$, находим по (16.15) в следующем порядке.

1. Определяем первое слагаемое, соответствующее корню $p_1 = -2{,}714$:

$$\frac{R(p_1)}{D'(p_1)} e^{p_1 t} =$$

$$= \frac{3{,}76x_0(-2{,}714)^2 + 12{,}83x_0(-2{,}714) + 11{,}16x_0}{11{,}28(-2{,}714)^2 + 25{,}66(-2{,}714) + 11{,}16} e^{-2{,}714t} =$$

$$= \frac{x_0(27{,}7 - 34{,}8 + 11{,}16)}{83{,}1 - 69{,}6 + 11{,}16} e^{-2{,}714t} =$$

$$= \frac{x_0 \cdot 4}{24{,}7} e^{-2{,}714t} = 0{,}163x_0 e^{-2{,}714t}.$$

2. Определяем слагаемые, соответствующие сопряженным комплексным корням $p_1 = -0{,}3485 + j0{,}9783$ и $p_2 = -0{,}3485 - j0{,}9783$. Для определения амплитуды и фазы движения определим с помощью одного из комплексов (16.17) значения δ и ω. Например, при значении корня p_2 с учетом (16.21) и (16.22) получим

$$\frac{R(p_2)}{D'(p_2)} = \frac{3{,}76x_0(-0{,}3485 + j0{,}9783)^2 + 12{,}83x_0(-0{,}3485 + j0{,}9783 + 11{,}16x_0}{11{,}28(-0{,}3485 + j0{,}9783)^2 + 25{,}66(-0{,}3485 + j0{,}9783) + 11{,}16} =$$

$$= x_0 \frac{-3{,}14 - j2{,}56 - 4{,}47 + j12{,}55 + 11{,}16}{-9{,}43 - j7{,}69 - 8{,}94 + j25{,}1 + 11{,}16} = x_0 \frac{3{,}55 + j9{,}99}{-7{,}21 + j17{,}4} =$$

$$= x_0 \frac{-3{,}55 - j9{,}99}{7{,}21 - j17{,}4} = x_0 \frac{(-3{,}55 - j9{,}99)(7{,}21 + j17{,}4)}{(7{,}21 - j17{,}4)(7{,}21 + j17{,}4)} =$$

$$= x_0 \frac{-25{,}6 - j61{,}8 - j72 + 172}{7{,}21^2 + 17{,}4^2} = x_0 \frac{148 - j134}{52 + 303} =$$

$$= x \frac{148 - j134}{355} = x_0(0{,}417 - j0{,}377) = \delta - j\omega,$$

откуда

$$\delta = 0{,}417x_0 \text{ и } \omega = 0{,}377x_0.$$

Тогда амплитуда

$$A = \sqrt{\delta^2 + \omega^2} = \sqrt{x_0^2 \cdot 0{,}417^2 + x_0^2 \cdot 0{,}377^2} =$$

$$= x_0\sqrt{0{,}417^2 + 0{,}377^2} = x_0\sqrt{0{,}174 + 0{,}142} =$$

$$= x_0\sqrt{0{,}316} = x_0 \cdot 0{,}562.$$

Фаза движения

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{\omega}{\delta} = \operatorname{arctg}\frac{0{,}377}{0{,}417} = \operatorname{arctg} 0{,}90,$$

т. е.

$$\operatorname{tg}\varphi = 0{,}90; \ \varphi \approx 42°,$$

или

$$\varphi = \frac{42}{57{,}3} = 0{,}73 \text{ рад.}$$

При этом слагаемое (16.19) принимает вид

$$2Ae^{\alpha t}\cos(\beta t + \varphi) =$$

$$= 2 \cdot x_0 \cdot 0{,}562 \cdot e^{-0{,}3485t}\cos(0{,}9783t + 0{,}73) =$$

$$= 1{,}124 \cdot x_0 \cdot e^{-0{,}3485t}\cos(0{,}9783t + 0{,}73).$$

Тогда искомая функция $x(t)$ по (16.15)

$$x(t) = 0{,}163 \cdot x_0 e^{-2{,}714t} + 1{,}124 \cdot x_0 e^{-0{,}3485t} \cdot \cos(0{,}9783t + 0{,}73),$$

что и будет интегралом дифференциального уравнения (16.20).

В начальных условиях ($t = 0$) при cos 0,73 = 0,7451 рад получим

$$x(0) = 0{,}163 \cdot x_0 + 1{,}124 \cdot x_0 \cos 0{,}73 \approx$$
$$\approx 0{,}163 \cdot x_0 + 1{,}124 \quad x_0 \cdot 0{,}7451 = 0{,}163 \cdot x_0 + 0{,}837 x_0 =$$
$$= 1{,}000 \cdot x_0 = x_0,$$

т. е. точность проведенных вычислений достаточно высокая.

Глава семнадцатая

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПОМОЩИ АВМ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электронные аналоговые вычислительные машины (АВМ), называемые также машинами непрерывного действия, широко используются во многих областях науки и техники для моделирования и расчета различных переходных процессов и динамических систем.

В области электроэнергетики АВМ нашли применение для решения различных задач, в частности, для моделирования переходных процессов в основных динамических элементах энергетики (синхронных генераторах, первичных двигателях); в статических элементах (линиях электропередач, трансформаторах, реакторах, некоторых видах нагрузок); для исследования синхронных и асинхронных режимов работы одномашинных и многомашинных систем; для исследования влияния «сильного» регулирования возбуждения генераторов на устойчивость параллельной работы генераторов и для ряда других задач [17-2, 17-7].

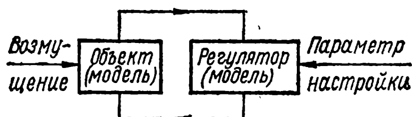


Рис. 17-1. Блок-схема определения структуры и параметров САР с помощью АВМ.

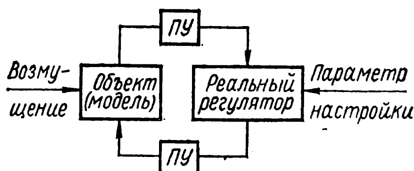


Рис. 17-2. Блок-схема для исследования реального объекта с помощью АВМ.

Важное место АВМ принадлежит также в исследовании систем автоматического управления (САУ) и систем автоматического регулирования (САР) объектов энергосистем.

Применение АВМ дает возможность решать следующие задачи:

1. Определение параметров и структуры САР. В этом случае на АВМ создается модель регулятора и объекта, а в результате моделирования находится структура и параметры САР, отвечающие заданным техническим условиям (рис. 17-1).

2. Исследование в лабораторных условиях автоматического регулятора в замкнутой системе. Сопряжение АВМ и регулятора

обеспечивается дополнительным преобразующим устройством — ПУ (рис. 17-2).

3. Нахождение различных возмущений, действующих на систему по найденному переходному процессу при действии определенных начальных условий (рис. 17-3).

В основу построения АВМ положен принцип математического моделирования прямой или непрямой аналогии.

Метод прямой аналогии основан на идентичности уравнений, описывающих изучаемый физический процесс или явление, и модели и состоит в том, что каждой физической величине реального объекта соответствует определенная физическая величина модели.

Метод непрямой аналогии, или структурной математической модели, подразумевает выполнение различных математических операций с помощью специальных решающих блоков, при этом мгновенному значению исследуемой переменной (независимо от ее физической природы) соответствует мгновенное значение машинной переменной.

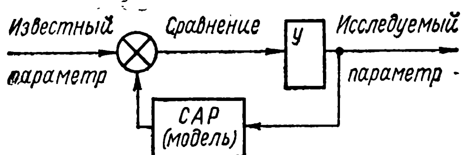


Рис. 17-3. Блок-схема синтеза САР с помощью АВМ.

На основе метода прямой аналогии решаются задачи определенного заранее известного вида и поэтому он служит для построения специализированных АВМ. Применение метода непрямой аналогии позволяет решать широкий класс задач, поэтому АВМ, использующие этот метод, являются универсальными.

Применение АВМ обусловлено рядом их достоинств, основными из которых являются:

1) исключительно высокое быстродействие;

2) сравнительно несложный процесс подготовки задачи;

3) возможность проведения исследования процесса как в натуральном времени, так и в ускоренном или замедленном;

4) простота, наглядность и удобство ввода и получения информации на выходе машины;

5) высокая надежность и стабильность в работе;

6) относительно невысокая стоимость и незначительные затраты на эксплуатацию.

К недостаткам АВМ относятся: ограниченная точность решения задач (основная погрешность решения составляет 0,5—3%) и известная алгоритмическая ограниченность, связанная с особенностями построения структурных схем.

Класс задач, решаемых на АВМ, и проявление тех или иных свойств АВМ обусловлены их основными техническими характеристиками.

Серийные отечественные АВМ отличаются схемным и конструктивным исполнением блоков, выполняющих определенные математические операции, схемами управления, вспомогательной аппаратурой и точностью выполнения расчетов, которые определяют степень приближения модели к исходной исследуемой системе. Основные техни-

ческие характеристики некоторых отечественных АВМ приведены в таблицах приложения IV. Для получения более подробных сведений и характеристик современных АВМ можно воспользоваться литературой [17-3, 17-5, 17-7, 17-8, 17-9].

Из моделей АВМ, представленных в таблице приложения IV, наиболее широкое распространение получила машина МН-7 (МН-7М) из-за универсальности и невысокой стоимости. Эта модель предназначена для моделирования переходных процессов в системах автоматического регулирования и управления, которые описываются линейными или нелинейными дифференциальными уравнениями до шестого порядка включительно. Уравнения могут содержать до четырех нелинейных зависимостей типа произведения или функции одной переменной, а также ряд типичных нелинейностей, свойственных САР.

Модель МН-7 может работать также совместно с реальной аппаратурой исследуемой САР, если входные и выходные величины этой аппаратуры представлены в виде соответствующих напряжений постоянного тока. Комплект МН-7 включает: решающий (вычислительный) блок, построенный на усилителях постоянного тока, блок питания и электроннолучевой индикатор. Кроме того, предусмотрена возможность подключения к модели дополнительного блока постоянного запаздывания, возможность сопряжения двух моделей МН-7 с передачей управления любой из них, возможность сопряжения с электроннолучевым минимизатором и ряд других. В дальнейшем будет показано применение этой модели для моделирования систем автоматического регулирования.

ОСНОВНЫЕ БЛОКИ АВМ

АВМ — это устройство для реализации метода структурного математического моделирования. Модель исследуемой задачи состоит из ряда блоков, каждый из которых выполняет ту или иную математическую операцию или воспроизводит какую-либо функциональную зависимость. Состав решающих блоков и характер связей между ними полностью определяются видом математических операций и их последовательностью в математическом описании исследуемой САР.

Различают следующие группы блоков АВМ:

1. Линейные блоки, выполняющие операции интегрирования, дифференцирования, инвертирования, суммирования, масштабирования, т. е. умножения на постоянный коэффициент, а также совмещенные операции, например интегрирование с одновременным суммированием.

2. Нелинейные блоки, к которым относятся множительно-делительные устройства (МДУ) и различного рода функциональные преобразователи (ФП), использующие метод кусочно-линейной аппроксимации функций.

3. Блоки специального назначения, моделирующие отдельные звенья или передаточные функции САР; воспроизводящие типовые нелинейности, свойственные САР (релейные характеристики, зона нечувствительности, ограничение координат по модулю и т. д.); моделирующие постоянное запаздывание.

До последнего времени окончательно не установлены условные обозначения блоков, входящих в структурную схему задачи [17-4]. На рис. 17-4 приведены условные обозначения основных блоков, используемые в дальнейшем.

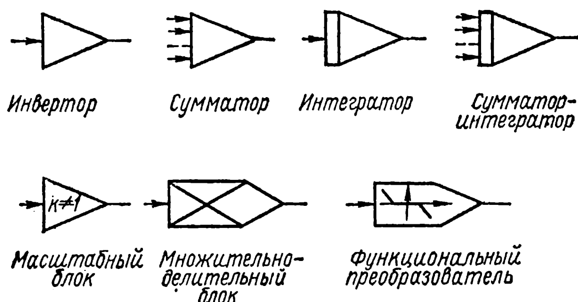


Рис. 17-4. Условные обозначения блоков АВМ на структурных схемах.

Основой построения решающих блоков АВМ является операционный усилитель, т. е. усилитель постоянного тока (УПТ), охваченный отрицательной обратной связью.

Представим схему операционного усилителя с n пассивными элементами, включенными на входе УПТ, и с элементом в цепи обратной связи (рис. 17-5).

На каждый из n входов через соответствующие комплексные сопротивления $Z_1 - Z_n$ подаются напряжения $U_1 - U_n$, в результате чего в этих цепях возникают токи $i_1 - i_n$, а в цепи обратной связи с комплексным сопротивлением Z_0 — ток i_0. При этом на выходе блока получаем напряжения $U_{вых}$. Общая точка $\sum$ входных цепей и цепи обратной связи называется суммирующей точкой операционного усилителя и является потенциально заземленной, т. е. $U_\Sigma \approx 0$, что обеспечивается значением коэффициента усиления УПТ $K_у \to \infty$.

Рис. 17-5. Блок операционного усилителя.

При этом справедливы следующие уравнения в операторном виде:

$$\sum_{s=1}^{n} i_s(p) = i_0(p) \tag{17.1}$$

и

$$U_{вых}(p) = -i_0(p) Z_0(p). \tag{17.2}$$

Учитывая соотношение

$$i_s(p) = \frac{U_s(p)}{Z_s(p)}$$

и подставляя (17.1) в (17.2), получим

$$U_{вых}(p) = -\sum_{s=1}^{n} \frac{Z_0(p)}{Z_s(p)} U_s(p),$$

или

$$U_{вых}(p) = -\sum_{s=1}^{n} \varphi_s(p)\, U_s(p), \qquad (17.3)$$

где $\varphi_s(p) = \frac{Z_0(p)}{Z_s(p)}$ — передаточная функция блока АВМ по s входу. Таким образом, вид математической операции, реализуемой блоком, определяется параметрами входной цепи и цепи обратной связи, а наличие отрицательной обратной связи увеличивает стабильность работы блока.

Рассмотрим принципиальные схемы операционных усилителей и математические операции, выполняемые ими.

Пусть число входов $n = 1$ и $Z_0(p) = R_0$, $Z_1(p) = R_1$, тогда схема рис. 17-5 описывается уравнением

$$U_{вых}(p) = -\frac{R_0}{R_1} U_1(p),$$

где $\frac{R_0}{R_1} = K_1$ — статический коэффициент передачи. Переходя от изображения к оригиналу, получим

$$U_{вых}(t) = -K_1 U_1(t), \qquad (17.4)$$

т. е. операционный усилитель осуществляет умножение на постоянный множитель. Такой режим усилителя называется *масштабным*. При $R_0 = R_1$ получаем $K_1 = 1$, т. е. выполняется операция инвертирования, а блок называется *инвертором*.

При числе входов n и при $Z_s(p) = R_s$, $Z_0(p) = R_0$ уравнение, описывающее блок, имеет вид

$$U_{вых}(p) = -\sum_{s=2}^{n} \frac{R_0}{R_s} U_s(p)$$

или

$$U_{вых}(t) = -\sum_{s=2}^{n} K_s U_s(t), \qquad (17.5)$$

где K_s — статический коэффициент передачи по s входу.

Такой блок называется *сумматором*.

Пусть число входов $n = 1$, $Z_1(p) = R_1$, но в цепь обратной связи включена емкость C_0, т. е. $Z_0(p) = \frac{1}{pC_0}$, тогда

$$U_{вых}(p) = -\frac{1}{pR_1C_0} U_1(p)$$

или

$$U_{вых}(t) = -\frac{1}{R_1C_0}\int\limits_0^t U_1(t)\,dt + U_{вых}(0). \qquad (17.6)$$

При этом блок осуществляет операцию интегрирования с одновременным умножением на множитель $\frac{1}{R_1C_0}$ и называется *интегратором*.

Операции интегрирования и суммирования удобно совмещать в одном блоке, называемом *сумматором-интегратором*. Тогда при числе входов n, $Z_0 = \frac{1}{pC_0}$, $Z_s(p) = R_s$ блок описывается уравнением

$$U_{вых}(p) = -\sum_{s=2}^{n}\frac{1}{pR_sC_0}U_s(p)$$

или

$$U_{вых}(t) = -\int\limits_0^t\sum_{s=2}^{n}\frac{1}{R_sC_0}U_s(t)\,dt + U_{вых}(0). \qquad (17.7)$$

Для УПТ, во входную цепь которого включена емкость C_1, а в цепь обратной связи — сопротивление R_0, уравнение, связывающее выходные и входные напряжения, имеет вид

$$U_{вых}(p) = -pR_0C_1U_1(p)$$

или

$$U_{вых}(t) = -R_0C_1\frac{dU_1}{dt}, \qquad (17.8)$$

т. е. такой блок осуществляет операцию дифференцирования входного напряжения с умножением на множитель R_0C_1.

При моделировании САР часто возникает необходимость воспроизводить те или иные функциональные зависимости, которые могут быть заданы аналитически, графически или с помощью таблиц. Устройства, воспроизводящие нелинейные функции, называются *блоками нелинейных функций* (БНФ).

Для получения нелинейной функциональной зависимости вида $Y = F(x)$, где $F(x)$ — однозначная непрерывная нелинейная функция одной переменной, можно использовать универсальный БНФ типа БН-10 (блок нелинейностей), входящий в состав комплекта модели МН-7, или БНК (блок нелинейностей комбинированный) для модели МН-7М.

Универсальные БНФ позволяют реализовать достаточно широкий класс нелинейных функций одного переменного. Заданная функция $Y = F(x)$ представляется по методу кусочно-линейной аппроксимации функцией $y = f(x)$ в виде алгебраической суммы конечного числа линейных функций по формуле

$$y = f(x) = Y_0 + b_0x + \sum_{i=1}^{n} b_i(x - x_{i\,нач}), \qquad (17.9)$$

где $Y(0)$ — начальное значение ординаты при $x = 0$;

$b_0 x$ — отрезок, проходящий через начальное значение ординаты с угловым коэффициентом b_0;

$b_i(x_i - x_{i_{нач}})$ — линейные отрезки, сдвинутые относительно начала координат на величину $x_{i_{нач}}$ и имеющие наклон, характеризуемый коэффициентом b_i, который принимает значения

$$b_i = \left\{ \begin{array}{ll} B_i = \text{const} & \text{при } x > x_{i_{нач}} \\ 0 & \text{при } x \leqslant x_{i_{нач}} \end{array} \right\} \text{ для } x_{i_{нач}} > 0$$

либо

$$b_i = \left\{ \begin{array}{ll} B_i = \text{const} & \text{при } x < x_{i_{нач}} \\ 0 & \text{при } x \geqslant x_{i_{нач}} \end{array} \right\} \text{ для } x_{i_{нач}} < 0.$$

При моделировании $f(x)$ по выражению (17.9) каждая составляющая величина отображается соответствующим напряжением и поэтому функциональный преобразователь будет выполнять операции

$$U_{вых} = U_{вых_0} + b_0 \frac{M_x}{M_y} U_{вх} + \sum_{i=1}^{n} b_i \frac{M_x}{M_y} (U_{вх} - U_{вх i_{нач}}), \quad (17.10)$$

где M_x, M_y — масштабы представления величин x и y.

Введя обозначения

$$k_0 = b_0 \frac{M_x}{M_y} \quad \text{и} \quad k_i = b_i \frac{M_x}{M_y},$$

получим выражение (17.10) в виде

$$U_{вых} = U_{вых_0} + k_0 U_{вх} + \sum_{i=1}^{n} k_i (U_{вх} - U_{вх i_{нач}}), \quad (17.11)$$

где

$$k_i = \left\{ \begin{array}{ll} K_i = \text{const} & \text{при } U_{вх} > U_{вх i_{нач}} \\ 0 & \text{при } U_{вх} \leqslant U_{вх i_{нач}} \end{array} \right\} \text{ для } U_{вх i_{нач}} > 0$$

либо

$$k_i = \left\{ \begin{array}{ll} K_i = \text{const} & \text{при } U_{вх} < U_{вх i_{нач}} \\ 0 & \text{при } U_{вх} \geqslant U_{вх i_{нач}} \end{array} \right\} \text{ для } U_{вх i_{нач}} < 0.$$

Таким образом, для моделирования функции $f(x)$ согласно выражения (17.11) необходимо воспроизводить сумму напряжений.

Напряжение U_0, которое является постоянным, можно получить с помощью делителя, на который подается опорное напряжение.

Напряжение $k_0 U_{вх}$ линейно зависит от $U_{вх}$ и поэтому может быть также получено с помощью делителя, на который подается $U_{вх}$ непосредственно либо через инвертор, в зависимости от знака k_0.

Напряжение $U_{\text{вых }i} = k_i (U_{\text{вх}} - U_{\text{вх}i_{\text{нач}}})$ может быть получено с помощью трехполюсных диодных ячеек, схема которых определяется параметрами моделируемого отрезка, $U_{\text{вх}i_{\text{нач}}}$, углом наклона γ_i и положением отрезка на плоскости в координатах

$$U_{\text{вых }i} = f(U_{\text{вх}}).$$

В зависимости от режима работы диода в ячейках последние подразделяют на два вида: ячейки, работающие на отпирание, и ячейки, работающие на запирание, условно названные типом A и B соответственно. Примеры выполнения диодных ячеек, моделирующих отрезки функций, расположенных в одном из четырех квадрантов, приведены на рис. 17-6 (тип A и тип B, для которого $U_{\text{вх}}$ и $E_{\text{оп}}$ указаны в скобках).

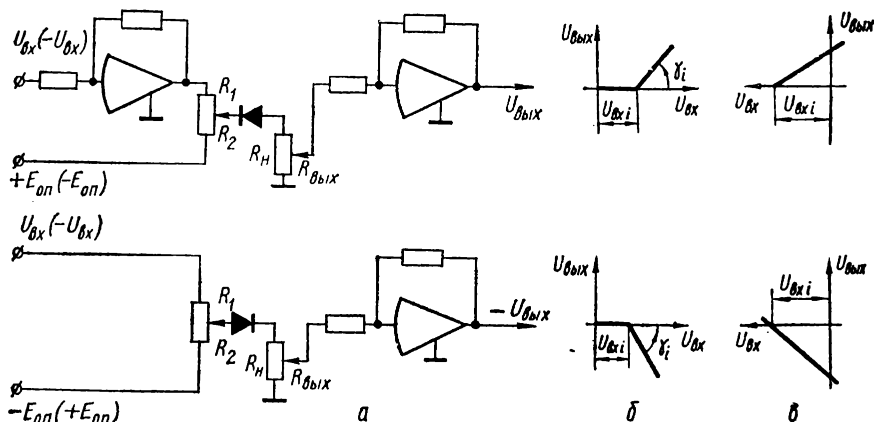


Рис. 17-6. Схемы диодных ячеек типов А и В (*а*) и воспроизводимые ими функции (*б*) и (*в*) соответственно.

Изменяя соотношения сопротивлений и величину опорного напряжения $E_{\text{оп}}$, можно производить настройку ячейки для моделирования необходимого отрезка. Выбор параметров ячейки для ее настройки можно произвести по формулам

$$k_i = \operatorname{tg} \gamma_i = \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{н}}\left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_{\text{н}}}\right)};$$

$$U_{\text{вх}i_{\text{нач}}} = \frac{R_1}{R_2} E_{\text{оп}}.$$

При настройке блока моделируемой функции $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ необходимо учитывать точность ее воспроизведения. Для этого строится область аппроксимации $f(U_{\text{вх}}) \pm \varepsilon_{\text{макс}}$, где $\varepsilon_{\text{макс}}$ есть максимально допустимое отклонение, которое может быть выражено в процентах:

$$\varepsilon_{\text{макс}}\% = \frac{\varepsilon_{\text{макс}}}{U_{\text{вых. макс}}} \cdot 100\%.$$

Принципиальные схемы типовых диодных блоков нелинейных функций и методика их настройки приводятся также в литературе [17-1, 17-5, 17-6].

Важным классом нелинейных решающих устройств являются блоки, выполняющие операции перемножения и деления.

По способу выполнения математических операций блоки перемножения и деления подразделяются на два класса: прямого и косвенного действия.

Блоки п р я м о г о действия используют какое-либо физическое устройство, в основе которого лежит операция умножения или деления, например потенциометрические схемы, следящие устройства, блоки с использованием эффекта Холла, блоки время-импульсного типа.

Блоки к о с в е н н о г о действия осуществляют операцию перемножения или деления через другие математические операции.

Наиболее удобным для моделирования операции перемножения двух входных величин y_1 и y_2 является соотношение, использующее квадратичное преобразование сомножителей, в результате которого выходная величина z будет

$$z = y_1 y_2 = \frac{1}{4}[(y_1 + y_2)^2 - (y_1 - y_2)^2]. \qquad (17.12)$$

Существуют и другие соотношения, например логарифмическое [17-1], согласно которому

$$z = y_1 y_2 = e^{(\ln y_1 + \ln y_2)}.$$

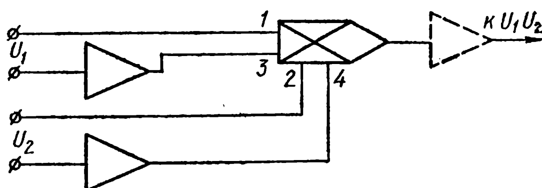


Рис. 17-7. Схема использования блока произведения (БП-4).

На основе соотношения (17.12) выполняется блок перемножения типа БП-4 модели МН-7 (рис. 17-7). На входы блока *1—3* подаются напряжения U_1 и $-U_1$, а на входы *2—4* — U_2 и $-U_2$, пропорциональные сомножителям y_1 и y_2. В результате блоком реализуется формула

$$U_{вых} = -\frac{1}{400}\{|U_1 - U_2|^2 + [-(-|U_1 + U_2|)^2]\} = kU_1U_2, \qquad (17.13)$$

где $k = 0{,}01$ — постоянный коэффициент блока. Из (17.13) следует, что блок состоит из двух схем выделения модулей $|U_1 - U_2|$ и $-|U_1 + U_2|$, двух диодных квадраторов с характеристиками в первом и третьем квадрантах и суммирующего операционного усилителя, который подключается извне и служит выходом блока.

Во входные цепи блока включаются два инвертора для получения знакопеременных сомножителей, что обеспечивает соблюдение необходимого знака выходного напряжения $U_{вых}$. Погрешность операции перемножения блоком не превосходит $\pm 1\%$ при нормальных условиях окружающей среды. Работа с блоками БП-4 проста и не требует частой его проверки и настройки.

Операция деления может быть осуществлена одним из двух способов: либо умножением делимого y_1 на величину, обратную делителю $(1/y_2)$, т. е. частное находится по соотношению $z = y_1 \frac{1}{y_2}$, либо методом неявной функции, т. е. моделированием уравнения вида

$$y_2 z - y_1 = \Delta,$$

где Δ — разность, стремящаяся к нулю.

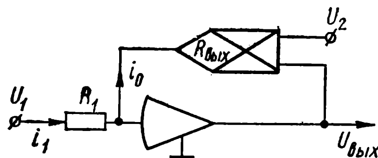


Рис. 17-8. Схема воспроизведения деления методом неявной функции.

Предпочтительным является второй способ, поскольку он не требует функционального преобразователя и может быть реализован на суммирующем усилителе, в цепь обратной связи которого включен блок произведения (рис. 17-8). Для приведенной схемы справедливы следующие выражения: для тока цепи обратной связи

$$i_0 = \frac{U_\Sigma - k_2 U_2 U_{вых}}{R_{вых}};$$

для тока входной цепи

$$i_1 = \frac{U_1 - U_\Sigma}{R_1},$$

где U_1, U_2 — напряжения, пропорциональные y_1 и y_2;

$U_{вых}$ — выходное напряжение схемы;

k_2 — постоянный коэффициент блока произведения;

$R_{вых}$, R_1 — сопротивления выходной цепи блока произведения и входной цепи сумматора соответственно.

Поскольку для операционного усилителя напряжение U_Σ в суммирующей точке может быть принято равным нулю, можно записать

$$\frac{U_1}{R_1} = -\frac{k_2}{R_{вых}} U_2 U_{вых},$$

откуда

$$U_{вых} = -\frac{R_{вых}}{k_2 R_1} \cdot \frac{U_1}{U_2} = -k \frac{U_1}{U_2}.$$

Таким образом, по схеме рис. 17-8 моделируется операция деления, однако следует отметить, что величина U_2 может быть только положительна, в противном случае схема неустойчива.

Блоки специального назначения применяются для моделирования отдельных звеньев или элементов САР. Совокупность таких блоков

составляет математическую структурную модель реальной системы регулирования. При этом каждое звено САР реализует определенную зависимость входной и выходной величины, которая называется *передаточной функцией звена* и в операторной форме имеет вид

$$W(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)}, \quad (17.14)$$

откуда $U_{\text{вых}}(p) = W(p)\,U_{\text{вх}}(p)$ и, следовательно, свойства звена определяются видом их передаточной функции $W(p)$.

Типовые звенья [17-2, 17-5] имеют следующие передаточные функции:

безынерционное звено — $W(p) = k$;

апериодическое звено первого порядка (инерционное звено) — $W(p) = \frac{k}{Tp+1}$;

интегрирующее (астатическое) звено — $W(p) = \frac{k}{p}$;

реальное интегрирующее звено — $W(p) = \frac{k}{p(Tp+1)}$;

идеальное дифференцирующее звено — $W(p) = kp$;

реальное дифференцирующее звено — $W(p) = \frac{kp}{Tp+1}$;

колебательное (апериодическое) звено второго порядка при $T_1 = T_2$ —

$$W(p) = \frac{k}{T_2^2 p + T_1 p + 1},$$

где k и T — постоянные звеньев.

Все вышеперечисленные звенья формируются на основе операционного усилителя, в цепь обратной связи и во входную цепь которого включаются различные по структуре RC-элементы так, чтобы выполнялось соотношение (17.3)

$$W(p) = \varphi(p) = \frac{Z_0(p)}{Z_{\text{вх}}(p)},$$

где $Z_0(p)$ и $Z_{\text{вх}}(p)$ — эквивалентные сопротивления обратной и входной цепей операционного усилителя.

Кроме указанных передаточных функций основных звеньев, САР реализует передаточные функции, для которых характерно скачкообразное изменение в зависимости от входной величины. К ним относятся нелинейные передаточные функции, моделирующие зону нечувствительности, релейные характеристики, ограничение координат по модулю и ряд других. Для воспроизведения этих характеристик используются операционные усилители в сочетании с диодными ячейками. Схемы подключения диодных ячеек и их параметры определяются видом моделируемой передаточной функции.

Рассмотрим моделирование характеристик, свойственных устройствам систем автоматики.

Зона нечувствительности (рис. 17-9, *а*) характерна для многих устройств автоматики (электрических двигателей, датчиков и т. п.) и может быть воспроизведена схемой, показанной на рис. 17-9, *б*.

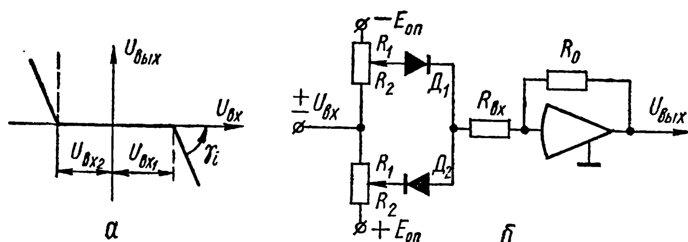


Рис. 17-9. Моделирование зоны нечувствительности:
а — характеристика; *б* — схема.

При малых входных напряжениях, т. е. $|U_{вх}| < |U_{вх1}|$ или $|U_{вх}| < |U_{вх2}|$, диоды $Д_1$ и $Д_2$ закрыты опорным напряжением $\mp E_{оп}$ и напряжение на выходе схемы $U_{вых}$ равно нулю.

Величина $U_{вх1}$ или $U_{вх2}$ определяет ширину зоны нечувствительности, которая зависит от соотношения плеч сопротивления входного потенциометра и от значения $E_{оп}$, равного ± 100 В, т. е.

$$U_{вх} = \frac{R_1}{R_2} E_{оп}.$$

При положительном входном напряжении в момент, когда $U_{вх} = U_{вх1}$, открывается диод $Д_1$ и на выходе схемы появляется напряжение, которое при допущении того, что прямое сопротивление диода значительно меньше входного сопротивления $R_{вх}$, будет равно

$$U_{вых} = -\frac{R_0}{R_{вх}} U_{вх}.$$

В этом выражении отношение $\frac{R_0}{R_{вх}}$ определяет угол наклона характеристики

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{R_0}{R_{вх}}.$$

При смене полярности $U_{вх}$ выходное напряжение

$$U_{вых} = -\frac{R_0}{R_{вх}} (-U_{вх}) = \frac{R_0}{R_{вх}} U_{вх}.$$

Таким образом, схема рис. 17-9, *б* реализует обе ветви характеристики.

Характеристика ограничения координат по модулю и воспроизводящая ее схема показаны на рис. 17-10. Такая характеристика свойственна устройствам автоматики с предельным уровнем выходной мощности (преобразователям, электромашинным усилителям и т. п.). Ограничение выходного напряжения обусловлено резким изменением сопротивления цепи обратной связи операционного усилителя в зависимости от состояния диодов $Д_1$, $Д_2$ (закрыты или

открыты). При настройке схем ограничения необходимо учитывать, что входное напряжение при настройке должно быть значительно больше напряжения ограничения $U_{огр}$.

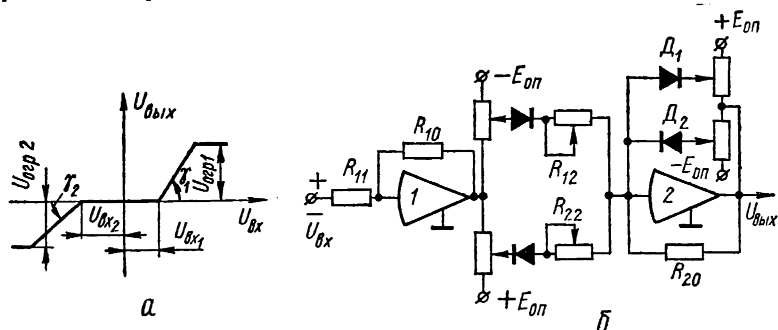


Рис. 17-10. Моделирование ограничения:
а — характеристика; *б* — схема.

Релейными характеристиками обладают все устройства автоматики, осуществляющие какие-либо переключения, т. е. перевод объекта из одного состояния в другое. Для их получения используются элементы рассмотренных выше схем.

Ряд разновидностей релейных характеристик и схемы для их воспроизведения приведены в литературе [17-1, 17-2, 17-6, 17-9]. Основой этих схем является схема ограничения координат по модулю при $R_0 \to \infty$, воспроизводящая идеальную релейную характеристику.

Гистерезисные характеристики (рис. 17-11, *а*) свойственны устройствам автоматики с двумя устойчивыми состояниями.

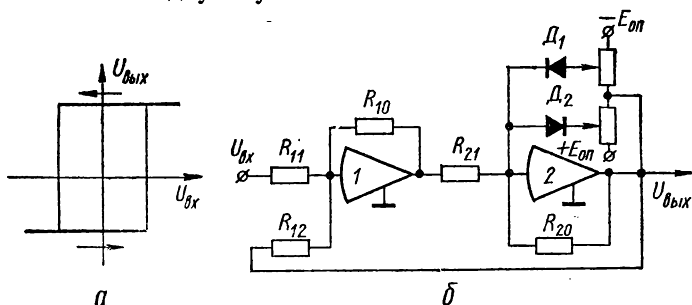


Рис. 17-11. Моделирование гистерезиса:
а — характеристика; *б* — схема.

Для воспроизведения гистерезисной характеристики используется схема, приведенная на рис. 17-11, *б*. В ее состав входит схема ограничения координат по модулю и входной сумматор, причем оба усилителя охвачены положительной обратной связью, наличие которой обеспечивает два устойчивых состояния схемы: либо при открытом диоде $Д_1$, либо при открытом — $Д_2$. Переход схемы из одного состояния в другое происходит, если входное напряжение $U_{вх}$ имеет фазу,

противоположную выходному напряжению, и удовлетворяет равенству

$$U_{вх} = -\frac{R_{11}}{R_{12}} U_{вых}.$$

Важной особенностью схем, использующих диодные ячейки, является свойство совместимости. При задании характеристик сложного вида они разбиваются на ряд участков, каждый из которых может быть воспроизведен одной из основных схем.

Пусть, например, задана характеристика — асимметричная зона нечувствительности с двусторонним ограничением (рис. 17-12, *а*). Анализируя исходную характеристику, приходим к выводу, что она может быть построена совмещением характеристик зоны нечувствительности (*I* и *III* квадранты) с ограничением координат по модулю.

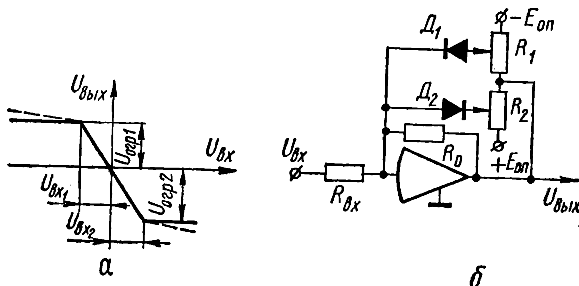


Рис. 17-12. Моделирование нетиповой характеристики:
а — характеристика; *б* — схема воспроизведения.

Схема воспроизведения заданной характеристики показана на рис. 17-12, *б* и дополнена по сравнению с исходными схемами (рис. 17-9, *б* и рис. 17-10, *б*) входным инвертором для соблюдения соответствия знаков $U_{вх}$ и $U_{вых}$ и потенциометрами R_{12} и R_{22} для выполнения требования асимметрии.

Исследование ряда САР связано с необходимостью ввода постоянного временного запаздывания, т. е. между входным и выходным напряжениями должна иметь место зависимость

$$U_{вых}(t) = U_{вх}(t - \tau), \qquad (17.15)$$

где τ — величина постоянного запаздывания, изменяющаяся в пределах 0,05—300 с.

Для моделирования запаздывания в АВМ применяются специальные блоки постоянного запаздывания (БПЗ). Известны различные способы воспроизведения постоянного запаздывания [17-4]. Один из них основан на реализации передаточной функции БПЗ, представленной рядом Пада. В операторной форме уравнение (17.15) имеет вид

$$U_{вых}(p) = e^{-p\tau} U_{вх}(p),$$

тогда на основе уравнения (17.14) получим передаточную функцию БПЗ

$$W_{\tau}(p) = e^{-p\tau}. \qquad (17.16)$$

Для моделирования $W_\tau(p)$ выражение (17.16) заменяется приближенным уравнением

$$W_\tau(p) \approx 1 - \frac{12p\tau}{p^2\tau^2 + 6p\tau + 12}, \qquad (17.17)$$

представляющим собой два члена разложения величины $e^{-p\tau}$ в дробный ряд [17-5]. Из анализа уравнения (17.17) следует, что оно может быть воспроизведено схемой, состоящей из апериодического звена второго порядка и сумматора (рис. 17-13). Величина запаздывания τ будет определяться значениями RC-элементов, подключенных к операционному усилителю апериодического звена.

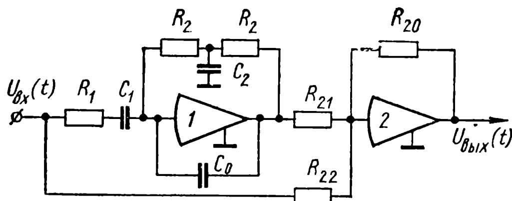


Рис. 17-13. Схема воспроизведения постоянного запаздывания.

Данный способ моделирования запаздывания целесообразно применять в тех случаях, когда τ не меняется, поскольку каждому новому значению τ должны соответствовать новые параметры RC-элементов.

Точность воспроизведения запаздывания определяется числом моделируемых членов ряда. Для увеличения точности можно, например, использовать шесть членов ряда, но для этого понадобится уже 10 операционных усилителей [17-5].

Технические характеристики ряда блоков АВМ приведены в приложении V.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА АВМ

Современные АВМ позволяют решать широкий класс задач по исследованию свойств САР и САУ. Выбор метода моделирования системы автоматического регулирования на АВМ в известной мере зависит от формы исходного математического представления исследуемой физической системы.

Динамические свойства любой САР можно описать, использовав для этого следующие основные формы:

а) одно линейное или нелинейное дифференциальное уравнение n-го порядка;

б) систему из n дифференциальных уравнений первого порядка;

в) систему, состоящую из m дифференциальных уравнений k-го порядка;

г) передаточную функцию разомкнутой или замкнутой системы.

В большинстве случаев задачи автоматического регулирования описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Это объясняется тем, что в реальных объектах связь между входными и выходными величинами нелинейна и часто задается в графической или неявной форме.

Проведение моделирования САР с учетом всех нелинейностей затруднено, а иногда и нецелесообразно, так как можно провести линеаризацию исходного уравнения [17-10], т. е. заменить точное нелинейное уравнение приближенным линейным.

Однако линеаризовать можно только такую функцию, которая дифференцируема в точке линеаризации, а сама функция и ее производные не терпят разрывов. Поэтому, исходя из физических представлений исследуемого процесса, перед линеаризацией необходимо проанализировать выполнение вышеоговоренных условий. В дальнейшем будем рассматривать в основном линейные дифференциальные уравнения, описывающие САР.

Пусть САР описывается линейным дифференциальным уравнением n-го порядка

$$\frac{d^n y}{dx^n} = F\left(x,\ y,\ \frac{dy}{dx},\ \frac{d^2y}{dx^2},\ \ldots,\ \frac{d^{n-1}y}{dx^{n-1}},\ f_i\right), \tag{17.18}$$

где x — независимая переменная; y и $y^{(n)}$ — функция и ее производные; f_i — возмущение.

Решив это уравнение, можно определить при любом необходимом значении независимой переменной x значение управляемой величины y при выбранном законе возмущения f_i и произвести количественную оценку качества исследуемого переходного процесса. Уравнение (17.18) может быть сведено к эквивалентной системе n уравнений первого порядка. Если ввести следующую замену переменных:

$$y = y_1;\ \frac{dy_1}{dx} = y_2;\ \ldots;\ \frac{dy_{n-1}}{dx} = y_n,$$

то получим систему

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dy_1}{dx} = y_2 \\ &\frac{dy_2}{dx} = y_3 \\ &\vdots \\ &\frac{dy_{n-1}}{dx} = y_n \\ &\frac{dy_n}{dx} = F(x,\ y_1,\ y_2,\ \ldots,\ y_n,\ f_i). \end{aligned}\right\} \tag{17.19}$$

На практике независимая переменная x обычно представляет собой время t и поэтому систему (17.19) следует считать динамической, поскольку она описывает свойства объекта во времени.

В случаях, когда исследуемая САР представляет совокупность различных типовых звеньев, удобной формой ее математического описания является система, состоящая из дифференциальных уравнений разного порядка, записанных в операторной форме.

Весьма распространенной формой описания САР является также запись в виде передаточной функции разомкнутой или замкнутой системы. Эта разновидность описания САР применяется для структурного анализа, конечной целью которого является исследование динамики системы.

В общем случае передаточная функция разомкнутой системы определяется отношением двух полиномов [17-10] как

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_1 p + a_0}, \qquad (17.20)$$

причем по условиям физической осуществимости системы всегда должно выполняться соотношение $m \leqslant n$.

Передаточная функция замкнутой системы определяется [17-10] как

$$\Phi(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_1 p + b_0}{c_n p + c_{n-1} p^{n-1} + \cdots + c_1 p + c_0}, \qquad (17.21)$$

где $c_i = a_i + b_i$ — коэффициенты характеристического полинома замкнутой системы.

Все четыре рассмотренные формы математической записи САР однозначно связаны между собой и, безусловно, взаимозаменяемы.

В соответствии с рассмотренными формами описания САР, задача моделирования изучаемого объекта на АВМ может быть решена следующими методами:

1) методом понижения порядка производной, или методом непосредственного n-кратного интегрирования;

2) методом структурного моделирования;

3) методом с применением пассивных RC-цепей.

Метод понижения порядка производной является реализацией структурной математической модели исследуемой САР. В основу этого метода положен метод неявных функций, заключающийся в том, что несмотря на то, что переменные, которые должны быть определены в результате решения, еще не получены, они могут быть поданы на входы решающих блоков структурной схемы, являющейся моделью системы-оригинала. Основу структурной математической модели составляют интегрирующие блоки, число которых соответствует порядку исходного дифференциального уравнения (17.18).

Этот метод также используется, если САР описана системой (17.19). В этом случае каждое уравнение исходной системы моделируется на одном из интеграторов, которые структурно объединяются последним уравнением системы.

Для решения задачи методом понижения порядка производной исходное дифференциальное уравнение или система приводится к виду, удобному для реализации на АВМ, при этом математическая модель оригинала не отражает структуру исследуемой САР. Кроме того, изменение параметров хотя бы одного звена САР ведет к пересчету всех коэффициентов уравнений математической модели. Несмотря на это, метод понижения порядка производной широко применяется, поскольку он реализуется типовыми решающими блоками АВМ, позволяет

получить кроме выходной величины также и ее производные и обеспечивает достаточную точность результата.

Метод структурного моделирования целесообразно применять для исследования САР в тех случаях, когда ставится задача анализа поведения отдельных звеньев системы автоматики или всей системы в целом. Это становится возможным, поскольку между структурой исследуемой реальной системы автоматики и структурной схемой модели существует строгое соответствие. При реализации этого метода на АВМ структурная схема модели составляется из отдельных типовых звеньев, каждое из которых воспроизводит определенную передаточную функцию, а их совокупность определяет передаточную функцию всей системы. Точность метода структурного моделирования в основном определяется точностью реализации отдельных передаточных функций.

Метод с применением пассивных RC-цепей в основном применяется для моделирования САР с уже найденными оптимальными параметрами и используется, если ставится требование компактного представления модели оригинала. При этом методе общее выражение передаточной функции системы, согласно (17.20), реализуется на одном операционном усилителе, в цепь обратной связи и во входную цепь которого включаются цепи сложной конфигурации. Особенностью этих схем является применение одного УПТ, что само по себе является достоинством. Однако наличие только одного УПТ является и причиной существенного недостатка, заключающегося в том, что изменение любого из параметров RC-цепи изменяет характер общей передаточной функции. Кроме того, этот метод менее точен, чем метод понижения порядка производной, поскольку точность воспроизведения общей передаточной функции определяется точностью подбора расчетных значений RC-элементов, которые обычно восполняются с разбросом 5—10%. Эти недостатки сужают область применения метода моделирования САР с помощью RC-цепей, однако, если в состав модели кроме регулируемых элементов входит реальная аппаратура, т. е. масштабирование по времени проводить нельзя, то здесь целесообразно использовать этот метод.

Таким образом, выбор метода моделирования САР зависит от характера и содержания конкретной задачи исследования и от требований к точности получения решения.

МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ЗАДАЧ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НА АВМ

Расчет переходного процесса системы автоматики на АВМ можно считать обоснованным тогда, когда математический характер исследуемой задачи соответствует возможностям АВМ.

Весь процесс моделирования задачи на АВМ независимо от выбранного метода решения можно представить следующими этапами:

1. Составление математического описания задачи.
2. Подготовка задачи для набора на АВМ.
3. Набор задачи на АВМ.
4. Решение задачи и регистрация результатов.
5. Обработка и анализ результатов.

Для осуществления математического моделирования необходимо, чтобы соблюдались следующие условия:

— тождественность уравнений, описывающих моделируемую систему-оригинал и модель;

— постоянство на всем интервале времени моделирования масштабных коэффициентов (масштабов), связывающих между собой переменные величины оригинала и модели.

Оба эти условия при работе на АВМ выполняются.

Процесс подготовки задачи, называемый также программированием, можно разбить на две части: предварительную подготовку и подготовку рабочего документа. Предварительная подготовка сводится к последовательному выполнению определенных математических преобразований и расчетов практически независимо от технических особенностей АВМ, на которой будут осуществляться набор и решение задачи. Затем подготавливается рабочий документ, в котором учитываются структуры линейных и нелинейных блоков и элементов конкретной АВМ и способы установки коэффициентов передач этих блоков.

При выполнении предварительной подготовки линейных однородных дифференциальных уравнений рекомендуется придерживаться такой последовательности подготовительных операций:

1. Приведение исходного математического описания к универсальному виду.

2. Выбор масштаба представления независимой переменной (времени).

3. Выбор масштабов представления зависимых математических переменных. Определение «пробных» значений масштабов.

4. Получение масштабированных машинных уравнений.

5. Определение начальных условий в машинных переменных (масштабирование начальных условий).

6. Составление первоначальной структурной схемы и ее анализ.

7. Составление машинных уравнений по структурной схеме.

8. Сопоставление масштабированных и «структурных» машинных уравнений.

9. Определение коэффициентов передач решающих блоков.

Проверив правильность подготовки с учетом нагрузочных способностей блоков, необходимо перейти к набору задачи на АВМ.

Набор задачи включает:

— соединение решающих блоков и элементов коммутационными шнурами в соответствии со структурной схемой рабочего документа;

— установку нулей УПТ;

— установку коэффициентов передач по картам настройки;

— установку начальных напряжений (масштабирование начальных условий).

После выполнения набора осуществляют пробные процессы решения, уточняют масштабы, коэффициенты передач и начальные напряжения.

После окончательной коррекции и соответствующих изменений в схеме (коэффициентов передач и начальных напряжений) проверяют нули УПТ и решают задачу («Пуск» АВМ), регистрируя требуемые результаты.

Рассмотрим последовательно методику подготовки и решения линейных однородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами применительно к АВМ типа МН-7.

1. Приведение исходного математического описания к универсальному виду, т. е. к системе дифференциальных уравнений первого порядка. Любое линейное дифференциальное уравнение n-го порядка с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}} + a_{n-2}\frac{d^{n-2}y}{dt^{n-2}} + \cdots + a_1\frac{dy}{dt} + a_0 y = 0 \qquad (17.22)$$

и с начальными условиями вида

$$y(0) = C_1;\ \frac{dy}{dt}(0) = C_2;\ \ldots;\ \frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}}(0) = C_n$$

всегда может быть сведено к следующей системе n линейных дифференциальных уравнений первого порядка с n неизвестными:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dy_1}{dt} = y_2 \\ &\frac{dy_2}{dt} = y_3 \\ &\vdots \\ &\frac{dy_{n-1}}{dt} = y_n \\ &\frac{dy_n}{dt} = -a_{n-1}y_n - a_{n-2}y_{n-1} - \cdots - a_1 y_2 - a_0 y_1 \end{aligned}\right\} \qquad (17.23)$$

и с начальными условиями вида

$$y_1(0) = C_1;\ y_2(0) = C_2;\ \ldots;\ y_n(0) = C_n$$

введением замены:

$$y = y_1;\ \frac{dy}{dt} = y_2;\ \frac{d^2y}{dt^2} = y_3;\ \ldots;\ \frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}} = y_n.$$

2. Выбор масштаба представления независимой переменной (времени). При решении задач на АВМ независимая математическая переменная t (реальное время) моделируется физической независимой переменной τ (машинным временем). Эти величины связаны между собой простым масштабным соотношением

$$t = M_\tau \tau,$$

где M_τ — масштаб времени (безразмерный масштабный коэффициент, который должен быть постоянным во всем интервале времени моделирования).

Для задач, в которых АВМ сопрягается с реальной аппаратурой, моделирование должно выполняться только в реальном масштабе времени, т. е. $M_\tau = 1$, $t = \tau$.

При исследовании медленных процессов необходимо выбирать $M_\tau > 1$. С увеличением τ процесс решения ускоряется, так как $\tau < t$ и t секунд реального времени представляется в АВМ меньшим интервалом масштабного времени τ.

Исследование высокочастотных процессов обусловливает выбор $M_\tau < 1$. Это позволяет замедлить процесс решения ($\tau > t$) и уменьшить «собственные» частоты до требуемых значений.

Другие ограничения, накладываемые на выбор M_τ, связаны с уменьшением точности при увеличении времени интегрирования и статических передаточных коэффициентов интеграторов при ускорении процесса.

Практические рекомендации для выбора масштаба времени следующие:

а) наилучшие результаты получаются при продолжительности процесса 5 ÷ 200 с, т. е.

$$\frac{t_{\text{макс}}}{200} \leqslant M_\tau \leqslant \frac{t_{\text{макс}}}{5},$$

где $t_{\text{макс}}$ — требуемое время решения задачи (реальное); $\tau_{\text{макс}} = 200$ — время решения задачи на АВМ.

б) при изменении M_τ изменяются коэффициенты передач только интеграторов и сумматоров-интеграторов (при уменьшении M_τ — уменьшаются, при увеличении — увеличиваются). Поэтому M_τ может использоваться для «выравнивания» коэффициентов машинных уравнений, особенно для уменьшения больших коэффициентов передач (больших 20) и увеличения слишком малых (меньших 0,001).

3. Выбор масштабов представления зависимых математических переменных. В АВМ зависимыми физическими (машинными) переменными являются мгновенные значения напряжений, измеренные по отношению к земле. В соответствии с этим все зависимые математические переменные y_i отображаются в модели напряжением постоянного тока U_i, причем эти величины связаны между собой простым масштабным соотношением

$$y_i = M_i U_i, \quad i = 1, 2, \ldots, n, \tag{17.24}$$

где M_i — размерный масштабный коэффициент (1/В), постоянный во всем интервале времени моделирования.

Поскольку напряжения U_i являются выходными напряжениями аналоговых решающих блоков, то для предотвращения перегрузок или насыщения этих блоков, нарушающих нормальную работу АВМ, значения машинных переменных не должны выходить за пределы линейного диапазона, ограниченного значениями $+U_{\text{макс}}$ и $-U_{\text{макс}}$ (для АВМ типа МН-7 и для ламповых АВМ $U_{\text{макс}} = 100$ В). С другой стороны, желательно, чтобы данный линейный диапазон использовался, по возможности, полностью, так как при увеличении диа-

пазона увеличивается отношение сигнал/помеха, а следовательно, и точность.

Масштабы следует выбирать на основании неравенства, обеспечивающего работу блоков в линейном диапазоне,

$$M_i \geqslant \frac{|y_i|_{\text{макс}}}{U_{\text{макс}}}, \quad i = 1, 2, \ldots, n,$$

где $|y_i|_{\text{макс}}$ — наибольшее по абсолютной величине значение y_i.

Для повышения точности необходимо определять оптимальные значения масштабов M_i^* из уравнения

$$M_i^* = \frac{|y_i|_{\text{макс}}}{U_{\text{макс}}}, \quad i = 1, 2, \ldots, n.$$

Максимальное (по модулю) значение переменной иногда бывает очевидным из содержания задачи или его легко определить с помощью приближенных вычислений. Однако в ряде случаев получение этой оценки может быть связано с необходимостью более глубокого и сложного анализа. Особой необходимости в такой оценке нет, так как после одного или нескольких пробных решений на АВМ нетрудно определить эти значения и изменить масштабы M_i, которые предварительно выбраны на основе некоторых предположений.

Для удобства обратного пересчета (от машинных переменных U_i к математическим y_i) масштабы рекомендуется округлять и только в большую сторону, но чтобы не превысить линейный диапазон.

Масштабы подбираются таким образом, чтобы коэффициенты машинных уравнений, т. е. коэффициенты передачи, лежали в пределах, ограниченных техническими характеристиками АВМ.

4. Получение масштабированных машинных уравнений. Для выполнения этой операции необходимо в систему уравнений универсального вида (17.23) подставить значения зависимых переменных $y_i = M_i U_i$ и независимой переменной $t = M_\tau \tau$. Это возможно, так как M_τ и M_i постоянные величины в течение всего процесса решения.

После указанной подстановки система (17.23) примет вид

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dU_1}{d\tau} = M_\tau \frac{M_2}{M_1} U_2 \\ &\frac{dU_2}{d\tau} = M_\tau \frac{M_3}{M_2} U_3 \\ &\vdots \\ &\frac{dU_n}{d\tau} = -M_\tau a_{n-1} U_n - M_\tau \frac{M_{n-1}}{M_n} a_{n-2} U_{n-1} - \cdots \\ &\cdots - M_\tau \frac{M_2}{M_n} a_1 U_2 - M_\tau \frac{M_1}{M_n} a_0 U_1 \end{aligned}\right\} \quad (17.25)$$

5. Определение начальных условий. В общем случае каждый исследуемый процесс имеет определенные начальные условия $y(0)$, которые в машине представляются напряжением $U(0)$. Перед началом каждого однократного решения все конденсаторы, которые входят

в используемые интеграторы, должны быть заряжены до напряжения $U(0)$.

Исходя из того, что масштабные соотношения $y_i = M_i U_i$ справедливы во всем интервале времени моделирования, следовательно и в начальный момент, т. е. при $t = 0$ или $\tau = 0$, запишем

$$y_i(0) = M_i U_i(0),$$

откуда

$$U_i(0) = \frac{y_i(0)}{M_i} = \frac{C_i}{M_i}, \quad i = 1, 2, \ldots, n.$$

6. Составление структурной схемы. Этот этап, во-первых, отражает информацию, проходящую через блоки АВМ, и, во-вторых, служит руководством для составления и оформления рабочего документа.

При составлении структурной схемы для одного какого-либо масштабированного уравнения напряжения, находящиеся в правой части, считаем условно известными, а затем, используя необходимые дополнительные блоки или соединения, обеспечиваем действительное существование на всех входах этих напряжений.

Моделирование уравнения вида

$$\frac{dU_i}{d\tau} = M_\tau \frac{M_{i+1}}{M_i} U_{i+1}, \quad i = 1, 2, \ldots, n$$

осуществляется в АВМ методом понижения порядка производной (методом непосредственного интегрирования), т. е.

$$U_i = \int_0^\tau \left(M_\tau \frac{M_{i+1}}{M_i} U_{i+1} \right) d\tau + U_i(0).$$

Моделирование последнего уравнения системы (17.25) также осуществляется этим методом, но с одновременной операцией суммирования. При этом на входы блока сумматора-интегратора подаются напряжения U_i со знаками плюс или минус, в зависимости от знаков соответствующих коэффициентов машинного уравнения (17.25). При составлении структурной схемы необходимо учитывать, что любой блок АВМ, кроме основной своей математической операции, осуществляет также инвертирование.

Изображение структурной схемы рекомендуется выполнять, используя условные обозначения решающих блоков АВМ (рис. 17-4). На структурной схеме необходимо обозначить коэффициенты передачи блоков (кроме инверторов) по отдельным входам k_{mn}, где m — номер, присвоенный блоку, n — номер напряжения, подаваемого на вход блока. После составления структурной схемы ее необходимо проанализировать с целью упрощения. Например, если на входы сумматора-интегратора несколько напряжений поступают через инверторы, то их можно заменить одним сумматором с единичным коэффициентом по каждому входу.

7. Составление машинных уравнений по структурной схеме. Этот этап заключается в том, что по структурной схеме для каждого решающего блока, входящего в схему, записываются уравнения, связывающие выходные напряжения с входными.

Для интегратора машинные уравнения получают, исходя из того, что производная от выходного напряжения по машинному времени равна инвертированному произведению входного напряжения на соответствующий коэффициент передачи, т. е.

$$\frac{d(-U_i)}{d\tau} = -k_{i,\,i+1}U_{i+1}.$$

Для сумматора выходное напряжение равно инвертированной сумме входных напряжений, умноженных на коэффициенты передач по каждому входу. Для сумматора-интегратора имеет место совмещение двух предыдущих правил.

Таким образом составляется система структурных машинных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dU_1}{d\tau} &= k_{12}U_2 \\ \frac{dU_2}{d\tau} &= k_{23}U_3 \text{ и т. д.} \end{aligned} \tag{17.26}$$

8. Составление масштабированных и структурных машинных уравнений. Как уже отмечалось, необходимым условием для осуществления масштабированного моделирования является тождественность уравнений, описывающих моделируемую систему-оригинал и модель, набранную на АВМ. Это будет иметь место, если масштабированные машинные уравнения (17.25) совпадают по форме со структурными уравнениями (17.26) и коэффициенты соответствующих уравнений равны. Следовательно, должны выполняться соотношения

$$\begin{aligned} k_{12} &= M_\tau \frac{M_2}{M_1} \\ k_{23} &= M_\tau \frac{M_3}{M_2} \\ &\vdots \\ k_{nn} &= M_\tau |a_{n-1}| \\ k_{n1} &= M_\tau \frac{M_1}{M_n} |a_0|. \end{aligned} \tag{17.27}$$

9. Определение коэффициентов передач решающих блоков. Уравнения (17.27), называемые также *уравнениями эквивалентности*, позволяют однозначно определить каждый коэффициент передачи для всех блоков, составляющих модель, при выбранных масштабах $M\tau$, M_i и известных коэффициентах $a_{n-1}, \ldots, a_0$ исходных уравнений. Если количество уравнений системы (17.26) включает все математические переменные, то количество уравнений эквивалентности равно количе-

ству неизвестных коэффициентов передач. В противном случае необходимо ввести уравнение, определяющее неизвестные коэффициенты передач.

В первом приближении значения коэффициентов передач вычисляются по (17.27), но после пробного решения задачи они могут быть уточнены с целью улучшения точности работы модели. При определении окончательных значений коэффициентов передач необходимо учитывать, что погрешность потенциометров, номиналы схем и т. п. не позволяют устанавливать коэффициенты передач по входам сумматоров-интеграторов с точностью более 0,001. С другой стороны, увеличение коэффициентов передач приведет к возрастанию систематических и случайных погрешностей операционных усилителей. Для модели МН-7 (МН-7М) не рекомендуется получать сумму передаточных коэффициентов для сумматора больше 20, а для сумматора-интегратора или интегратора — больше 10. Таким образом, пробные значения коэффициентов передач решающих блоков должны быть в пределах 0,01—10. При необходимости возможна корректировка коэффициентов передач изменением $M\tau$.

Вторая часть подготовки задачи моделирования на АВМ состоит в оформлении рабочего документа, который включает рабочую структурную схему, карту настройки для линейных решающих блоков, карту настройки для нелинейных решающих блоков или блоков специального назначения. При проведении этой подготовки необходимо учитывать технические возможности и особенности используемой АВМ. По рабочей структурной схеме выполняется набор задачи на АВМ (для модели МН-7 это осуществляется на коммутационном поле машины), поэтому, сохраняя общую структуру первоначальной схемы, на рабочей схеме необходимо указать номера усилителей, номера входных сопротивлений и их номиналы, номиналы сопротивлений цепи обратной связи, номера потенциометров начальных условий, значения коэффициентов передач и начальных условий.

Для удобства установки значений коэффициентов передач и для уменьшения возможности установки ошибочного значения их рекомендуется составить карту настройки коэффициентов передач в виде таблицы, в которой следует указать значения требуемых коэффициентов передач, номер входа ($N_{вх}$), на который нужно подавать напряжение $U_{вх}$ при настройке, его величину, вычисленное значение выходного напряжения $U_{вых}$ и номер усилителя ($N_{упт}$), на котором осуществляется настройка.

После реализации набора модели задачи и настройки ее осуществляется пробное решение, а затем, после определенной корректировки, осуществляется окончательное решение и регистрация результатов. Для этого протекающий в модели процесс решения останавливают через равные интервалы времени и измеряют машинные переменные в режиме «Останов» либо методом непосредственной оценки (достаточно приблизительно), либо компенсационным методом (точно). Результаты измерений можно оформить в виде таблицы.

Для исследования динамики САР табличное представление результатов является не наглядным, поэтому в этом случае предпочтительней

графическое представление решения, получаемое с помощью электроннолучевого индикатора.

При использовании метода моделирования САР по отдельным звеньям для исходной структуры системы все основные положения рассмотренной методики остаются справедливы.

При реализации метода моделирования САР с помощью операционного усилителя и RC-цепей сложной конфигурации следует учитывать, что в АВМ отсутствуют специальные схемы для образования дробно-рациональных передаточных функций $W(p)$. Задача построения RC-схемы согласно заданной зависимости $W(p)$ решается для каждого конкретного случая. При этом рекомендуется [17-4] следующая последовательность: по заданной функции $W(p)$ предварительно выбирается схема RC-элементов и записывается ее передаточная функция так, что вместо коэффициентов a_i и b_i подставляются значения проводимостей элементов входной цепи и цепи обратной связи, устанавливаются соотношения между значениями RC-элементов и значениями постоянных коэффициентов, определяется возможность практической реализации схемы и оценка ее устойчивости.

Пусть задана передаточная функция вида

$$W(p) = \frac{b_2p^2 + b_1p + b_0}{a_1p}.$$

Предположим, что входная цепь операционного усилителя состоит из параллельно соединенных сопротивления R_1 и емкости C_1, тогда проводимость этой цепи

$$Y_{11}(p) = \frac{R_1C_1p + 1}{R_1},$$

а цепь обратной связи состоит из последовательно соединенных элементов R_2 и C_2, тогда проводимость этой цепи

$$Y_{22}(p) = \frac{C_2p}{R_2C_2p + 1}.$$

В этом случае передаточная функция принимает вид

$$W(p) = -\frac{Y_{11}(p)}{Y_{22}(p)} = -\frac{(R_1C_1p + 1)(R_2C_2p + 1)}{R_1C_2p},$$

или

$$W(p) = -\frac{R_1C_1R_2C_2p^2 + (R_1C_1 + R_2C_2)p + 1}{R_1C_2p}.$$

Сопоставляя это значение передаточной функции с исходным, получаем соотношения

$$a_1 = R_1C_2;$$

$$\frac{b_2}{b_0} = R_1C_1R_2C_2;$$

$$\frac{b_1}{b_0} = R_1C_1 + R_2C_2,$$

из которых при известных a_i и b_i можно определить значения параметров схемы, т. е. R_1, C_1 и R_2, C_2.

Различные варианты построения принципиальных RC-схем для моделирования дробно-рациональных передаточных функций представлены в [17-4, 17-5, 17-9].

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ САР НА АВМ

При использовании АВМ всегда возникает необходимость оценить степень совпадения процесса исследуемой реальной САР и его модели.

С этой точки зрения оценка соответствия включает два понятия: погрешность решения, или точность моделирования, и воспроизводимость процесса моделирования.

Точность моделирования определяется величиной отклонения численных значений решения, найденных аналитически, от значений, полученных на модели, и численно может быть оценена одной из средних вероятностных погрешностей [17-14].

Воспроизводимость моделирования характеризуется стабильностью получаемых результатов во времени и зависит от действия ряда случайных факторов.

Обе эти оценки взаимосвязаны и дополняют друг друга.

В целом степень соответствия исследуемого процесса и его модели определяется следующими основными факторами [17-4]:

1) погрешностями отдельных операционных блоков и устройств;
2) погрешностями в задании начальных условий и возмущений;
3) видом исходной системы уравнений и свойствами САР;
4) опытом оператора.

Основными причинами первых двух факторов следует считать: дрейф нуля УПТ, конечность значения коэффициента усиления УПТ, нестабильность во времени номиналов внешних элементов УПТ, нестабильность опорных напряжений в блоках нелинейных функций, неточности установки передаточных коэффициентов по входам УПТ и ряд других.

Степень третьего фактора определяется в основном свойством устойчивости системы регулирования. Если моделируемая САР неустойчивая, то всякого рода внутренние погрешности действуют как возмущения, что резко изменяет значения выходных величин.

Определенное значение для увеличения точности имеет и четвертый фактор — опыт оператора, который позволяет наилучшим образом составить структурную схему модели, оптимально выбрать масштабы представления исходных величин, учесть взаимосвязь отдельных блоков, точно провести настройку всей модели.

Для оценки погрешностей моделирования в принципе можно использовать следующие, получившие распространение, методы [17-7, 17-12, 17-13]:

а) метод подстановки;

б) метод сравнения с известным аналитическим численным решением;

в) метод моделирования установившегося решения;

г) метод многократного решения задачи при различных вариантах состава структурной схемы;

д) метод анализа и обобщения накопленного опыта.

Метод подстановки, как и метод моделирования установившегося решения, используется, как правило, для исключения грубых погрешностей и промахов. Первый метод основан на сравнении рассчитанных значений напряжений, соответствующих производным и неизвестным, с действительными значениями этих величин в соответствующих точках модели. Второй метод сводится к тому, что в установившемся режиме фиксируются отклонения производных от нулевых значений. Степень отклонения характеризует погрешность решения.

Метод многократного решения задачи при различных вариантах состава структурной схемы позволяет оценить влияние так называемой структурной погрешности и выбрать схему, обеспечивающую наилучшую точность для определенной задачи.

Общим для всех этих методов является то, что в конечном итоге осуществляется сравнение численных значений машинных величин со значениями, полученными каким-либо другим способом, на основе чего и производится оценка точности. Так, точность решения задачи на АВМ по переменной y_i можно оценить относительной среднеквадратичной погрешностью σ_i в процентах по формуле

$$\sigma_i\% = \frac{100}{|y_i|_{\text{макс. т}}} \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}[y_{\tau_j \text{м}} - y_{\tau_j \text{т}}]^2},$$

где $|y_i|_{\text{макс}}$ — максимальное абсолютное значение физической переменной y_i, определенной по точному решению; $y_{\tau_j \text{м}}$ и $y_{\tau_j \text{т}}$ — значения переменной, определенные в моменты τ_j по данным АВМ и по точному решению соответственно; n — число зарегистированных точек решения переменной y_i.

Ограничение применения такой оценки состоит в том, что для большинства задач получение точного решения связано с большим объемом вычислений или принципиально затруднительно. Кроме того, такая оценка носит в определенном смысле случайный характер, так как действие комплекса причин, обусловливающих погрешности, тоже случайны, т. е. степень их проявления заранее не может быть точно установлена. Это, с одной стороны, затрудняет реализацию мероприятий, уменьшающих их действие, а с другой — обусловливает необходимость применения вероятностных методов для оценки точности моделирования.

Задача оценки точности моделирования вероятностным методом состоит в следующем. Пусть имеем N результатов измерений (y_1, y_2, . . . , y_N), представляющих выборочные значения из генеральной совокупности, закон распределения которой задается известной плотностью. При выборе малого объема, что имеет место в данном случае, следует пользоваться интервальными оценками [17-14], поскольку этот прием позволяет установить точность и надежность оценок. Обо-

значим истинное значение результата решения через Y, а всякое отклонение от этого значения — через Δy, являющееся погрешностью результата. Пусть γ — вероятность P того, что результат решения отличается от истинного значения на величину, не большую чем Δy:

$$P\{\bar{y} - \Delta y \leqslant Y \leqslant \bar{y} + \Delta y\} \geqslant 1 - \alpha = \gamma, \tag{17.28}$$

где $\bar{y}$ — выборочная средняя,

α — уровень значимости.

Таким образом, образуется доверительный интервал (рис. 17-14), содержащий такие значения решения, принятие которых на основе выборочного значения $y = Y$ имеет вероятность

$$P\{y_1 \leqslant Y \leqslant y_2\} \geqslant 1 - \alpha = \gamma,$$

где y_1 и y_2 — нижняя и верхняя границы интервала. Вероятность γ называется доверительной вероятностью, или надежностью оценки y.

Приняв во внимание, что случайная величина Y распределена нормально, а следовательно, и выборочная средняя $\bar{y}$, найденная по независимым наблюдениям, также распределена нормально [17-14], выражение (17.28) можно представить в виде

$$P\left\{\left(\bar{y} - t\frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right) \leqslant Y < \left(\bar{y} + t\frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right)\right\} = 2\Phi(t), \tag{17.29}$$

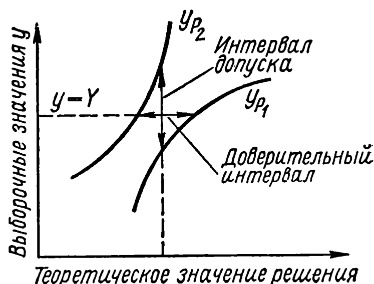


Рис. 17-14. К понятию доверительного интервала.

где $\Phi(t)$ — функция Лапласа с аргументом t;

σ — среднеквадратичное отклонение.

Использование оценки вида (17.29) предполагает известным среднеквадратичное отклонение σ, которое на практике чаще всего неизвестно. В этих случаях оценку точности производят по данным выборки, пользуясь распределением Стьюдента с $n = N - 1$ степенями свободы [17-14]. Применив это распределение, доверительный интервал для математического ожидания результата определяется выражением

$$\left(\bar{y} - t_\gamma\frac{s}{\sqrt{N}}\right) \leqslant Y < \left(\bar{y} + t_\gamma\frac{s}{\sqrt{N}}\right), \tag{17.30}$$

где s — выборочная средняя дисперсия; $t_\gamma = t_{n;\,\alpha/2}$ — коэффициенты распределения Стьюдента, значения которых в зависимости от n и α представлены в соответствующей таблице приложения VI.

По значению $\Delta y = t_\gamma \frac{s}{\sqrt{N}}$ можно найти относительную погрешность результата через соотношение

$$\varepsilon\% = \frac{\Delta y \cdot 100}{|y_i|_{\text{макс}}}.$$

При необходимости построения доверительного интервала для среднеквадратичного отклонения σ_y или дисперсии σ_y^2 можно использовать распределение χ^2 с $n = N - 1$ степенями свободы. Тогда с вероятностью γ доверительный интервал для дисперсии σ_y^2 при выборочной дисперсии s^2, вычисленной по выборке объема N, составляет

$$\frac{ns^2}{\chi^2_{n;\ \alpha/2}} \leqslant \sigma_y^2 < \frac{ns^2}{\chi^2_{n;\ 1-\alpha/2}}, \tag{17.31}$$

или для σ_y

$$\frac{\sqrt{n}\, s}{\chi^2_{n;\ \alpha/2}} \leqslant \sigma_y < \frac{\sqrt{n}\, s}{\chi^2_{n;\ 1-\alpha/2}},$$

где $\chi^2_{n;\ \alpha/2}$; $\chi^2_{n;\ 1-\alpha/2}$ — значения точек распределения χ^2 с $n = N - 1$ степенями свободы, приведенные в соответствующей таблице приложения VI.

Проиллюстрируем применение этих оценок точности. Пусть в результате независимых наблюдений $N = 10$ найдены значения интересующей величины $y_1 - y_{10}$, выборочное среднее которой

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} y_i = 30{,}4,$$

а выборочная дисперсия

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (y_i - \bar{y})^2 = 0{,}56.$$

Определим доверительный интервал для $\bar{y}$ при уровне значимости $\alpha = 0{,}02$, т. е. надежность оценки 0,98. Для этого находим по таблице распределения Стьюдента $t_{n;\ \alpha/2} = t_{9;\ 0{,}01} = 2{,}821$ и получаем границы интервала:

$$\bar{y} - t_\gamma \frac{s}{\sqrt{N}} = 30{,}4 - 0{,}675;$$

$$\bar{y} + t_\gamma \frac{s}{\sqrt{N}} = 30{,}4 + 0{,}675.$$

При этих интервалах ε составляет приблизительно 2%. Для определения доверительного интервала для σ_y^2 по таблицам распределения χ^2 находим:

$$\chi^2_{n;\ \alpha/2} = \chi^2_{9;\ 0{,}01} = 21{,}67;$$

$$\chi^2_{n;\ 1-\alpha/2} = \chi^2_{9;\ 0{,}99} = 2{,}09$$

и получаем границы интервала

$$\frac{ns^2}{\chi^2_{9;\ \alpha/2}} = 0{,}232 \quad \text{и} \quad \frac{ns^2}{\chi^2_{9;\ 1-\alpha/2}} = 2{,}41.$$

Таким образом, метод доверительных интервалов позволяет найти границы отклонения исследуемой величины от истинного значения с известной надежностью, т. е. оценить точность и стабильность результатов решения с учетом действия случайных факторов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ САР

Основная задача, которая ставится при моделировании САР, это исследование динамических свойств автоматической системы, которые определяют поведения системы как в переходных процессах, так и в установившихся режимах.

Основным и необходимым показателем качества системы автоматики является устойчивость, критерии которой подробно рассмотрены в предыдущих главах. В устойчивой системе переходный процесс затухает, однако важно знать показатели качества переходного процесса: время регулирования $t_р$, величину перерегулирования σ, основную частоту колебаний, количество колебаний и т. п.

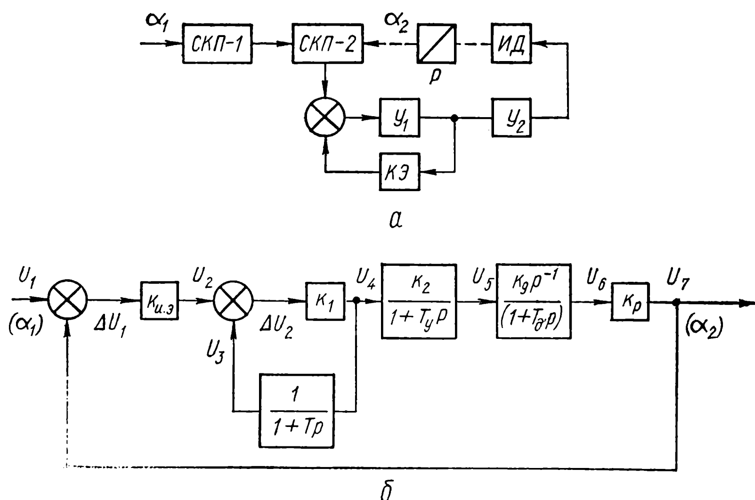


Рис. 17-15. Схемы следящей системы:
а — принципиальная; *б* — структурная.

Все эти показатели можно определить по переходной функции процесса $h(t)$, которую воспроизводит модель САР на АВМ.

Рассмотрим моделирование на АВМ ряда разновидностей систем автоматики, применяющихся в энергоустановках.

1. Пусть задана электромеханическая следящая система [17-11] по углу поворота α (рис. 17-15, *а*), включающая синусно-косинусный преобразователь (СКП), усилитель ($У_1$) с корректирующим элементом (КЭ), усилитель ($У_2$), исполнительный двигатель (ИД) и редуктор (Р).

Составим структурную схему системы регулирования, для чего каждый элемент реальной системы заменим определенным моделирующим его звеном (рис. 17-15, *б*).

По структурной схеме получим следующие уравнения в операторной форме, описывающие динамические свойства САР:

$$\begin{aligned} &\Delta U_1 = U_1 - U_7; && U_4 = k_1 \Delta U_2; \\ &U_2 = k_{\text{и.э}} \Delta U_1; && U_5 (1 + T_{\text{у}} p) = k_2 U_4; \\ &\Delta U_2 = U_2 - U_3; && U_6 (1 + T_{\text{д}} p)\, p = k_{\text{д}} U_5; \\ &U_3 (1 + Tp) = U_4; && U_7 = k_{\text{р}} U_6, \end{aligned} \tag{17.32}$$

где от ΔU_1 до U_7, U_1 — напряжения на выходе соответствующих звеньев схемы и входное напряжение; $k_{\text{и.э}}$, k_1, k_2, $k_{\text{д}}$, $k_{\text{р}}$ — коэффициенты усиления звеньев системы; T, $T_{\text{у}}$, $T_{\text{д}}$ — постоянные времени соответственно звеньев корректирующего элемента, усилителя и двигателя.

Определим передаточную функцию разомкнутой системы по известным [17-10] правилам:

$$W(p) = \frac{k_{\text{и. э}} k_1 k_2 k_{\text{д}} k_{\text{р}} (1 + Tp)}{(1 + k_1)\, p \left(1 + \dfrac{Tp}{1 + k_1}\right)(1 + T_{\text{у}} p)(1 + T_{\text{д}} p)}. \tag{17.33}$$

Обозначив через K общий коэффициент усиления разомкнутой системы, т. е.

$$K = \frac{k_{\text{и. э}} k_1 k_2 k_{\text{д}} k_{\text{р}}}{1 + k_1},$$

получим (17.33) в виде

$$W(p) = \frac{K (1 + Tp)}{p \left(1 + \dfrac{Tp}{1 + k_1}\right)(1 + T_{\text{у}} p)(1 + T_{\text{д}} p)}. \tag{17.34}$$

При равенстве постоянных времени корректирующего элемента и исполнительного двигателя передаточная функция (17.34) равна

$$W(p) = \frac{K}{p \left(1 + \dfrac{T_{\text{д}} p}{1 + k_1}\right)(1 + T_{\text{у}} p)}. \tag{17.35}$$

Рассмотрим моделирование этой системы регулирования различными методами.

Для реализации метода непосредственного интегрирования необходимо получить дифференциальное уравнение, описывающее заданную САР. Для этого найдем передаточную функцию замкнутой системы $\Phi(p)$ относительно регулируемой величины. Поскольку система регулирования охвачена отрицательной обратной связью, то $\Phi(p)$ можно определить [17-10] через $W(p)$:

$$\Phi(p) = \frac{U_7(p)}{U_1(p)} = \frac{W(p)}{1 + W(p)}.$$

Подставив значение $W(p)$ по уравнению (17.35), окончательно получим передаточную функцию $\Phi(p)$ в виде

$$\Phi(p) = \frac{K}{p\left(1 + \frac{T_{д}p}{1 + k_1}\right)(1 + T_{у}p) + K},$$

откуда после преобразований находим уравнение системы в операторной форме

$$a_1 p^3 U_7 + a_2 p^2 U_7 + a_3 p U_7 + K U_7 = K U_1, \tag{17.36}$$

где приняты следующие обозначения:

$$a_1 = \frac{T_{д} T_{у}}{1 + k_1}; \quad a_2 = T_{у} + \frac{T_{д}}{1 + k_1}; \quad a_3 = 1.$$

Представим (17.36) в дифференциальной форме, выделив старшую производную, т. е.

$$\frac{d^3 U_7}{dt^3} = \frac{K}{a_1} U_1 - \frac{a_2}{a_1} \cdot \frac{d^2 U_7}{dt^2} - \frac{1}{a_1} \cdot \frac{dU_7}{dt} - \frac{K}{a_1} U_7.$$

Структурная схема, моделирующая это уравнение, применительно к модели МН-7 показана на рис. 17-16, *а*.

Выбрав масштабы представления независимой переменной t и зависимой переменной α, из условий тождественности уравнений модели и оригинала определяются коэффициенты передач блоков и производится в соответствии с этим составление рабочей моделирующей схемы.

Для реализации метода структурного моделирования воспользуемся типовыми моделями отдельных звеньев. В результате замены звеньев заданной структурной схемы следящей системы (рис. 17-15, *б*) соответствующими типовыми моделями получим схему модели, представленную на рис. 17-16, *б*.

Связь между параметрами заданной системы и параметрами ее модели устанавливается на основе выражений для передаточных функций каждого звена. В соответствии с этим при единичных масштабах находим:

$$\begin{gathered} k_{и.\,э} = \frac{R_9}{R_1}; \quad k_1 = \frac{R_{10}}{R_2}; \quad k_2 = \frac{R_{11}}{R_3}; \quad k_{д} = \frac{R_{12}}{C_{12} R_4 R_5}; \\ k_{р} = \frac{R_{13}}{R_6}; \quad T = C_4 R_{15}; \quad T_{у} = C_1 R_{11}; \quad T_{д} = C_3 R_{12}. \end{gathered} \tag{17.37}$$

При известных числовых значениях параметров следящей системы и при выбранных значениях масштабов переменных соотношения (17.37) позволяют определить параметры модели, т. е. величины сопротивлений R_1— R_{16} и емкостей C_1 — C_4.

Схема модели рис. 17-16, *б* позволяет исследовать переходный процесс системы в зависимости от изменения параметров отдельных звеньев.

При использовании метода RC-цепей возьмем за основу передаточную функцию $W(p)$ по уравнению (17.35), которое можно представить в виде

$$W(p) = \frac{K}{p} \cdot \frac{1}{\frac{T_д T_у}{1+k_1} p^2 + \left(\frac{T_д}{1+k_1} + T_у\right) p + 1}. \qquad (17.38)$$

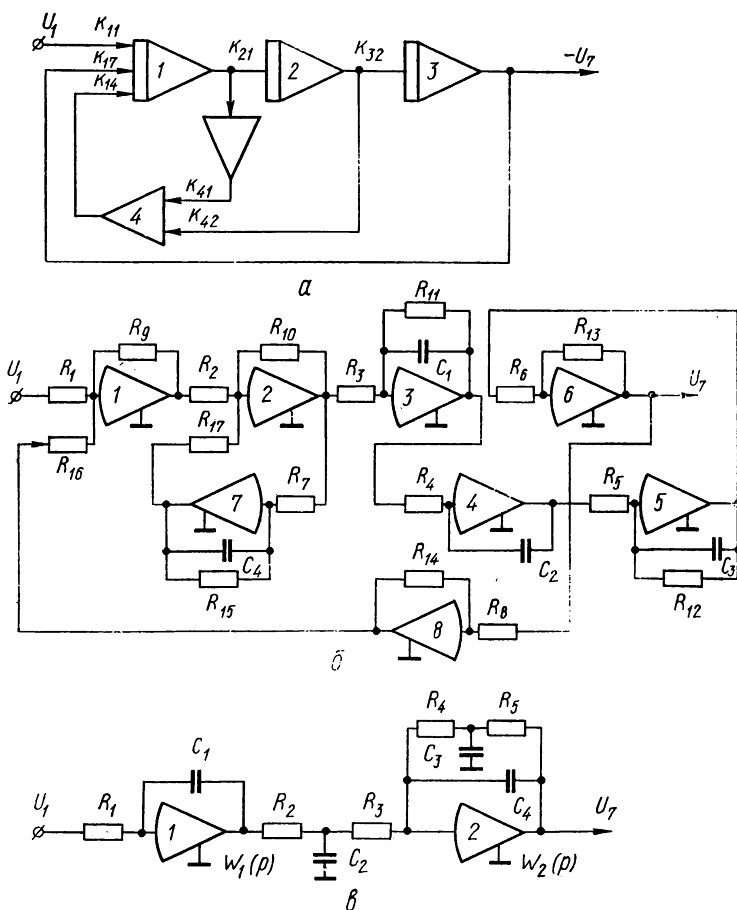


Рис. 17-16. Варианты построения схемы структурной модели следящей системы:

а — методом непосредственного интегрирования; *б* — методом структурного моделирования; *в* — методом RC-цепей.

Схема, моделирующая эту функцию, приведена на рис. 17-16, *в*. Для первого операционного усилителя передаточную функцию $W_1(p) = \frac{K}{p}$ и величины R_1 и C_1 можно определить по соотношению $K = \frac{1}{R_1 C_1}$.

Для второго операционного усилителя передаточная функция определяется составом RC-элементов входной цепи $Z(p)$ и цепи обратной связи $Z_0(p)$ и, согласно [17-5], равна

$$W_2(p) = \frac{Z_0(p)}{Z(p)} = -\frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{1}{(T_1 T_2 p^2 + T_2 p + 1)} .$$

При условии, что $A_1 = A_2$ и

$$\frac{T_д T_у}{1 + k_1} = T_1 T_2; \quad \frac{T_д}{1 + k_1} + T_у = T_2,$$

передаточная функция $W_2(p)$ соответствует второму сомножителю (17.38).

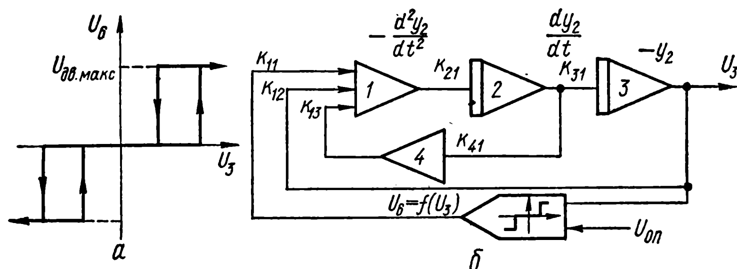


Рис. 17-17. Моделирование системы с релейной характеристикой:
а — характеристика, воспроизводимая ФП; *б* — схема.

При $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$ и $C_2 = C_3$ имеем соотношения

$$\frac{T_д T_у}{1 + k_1} = R^2 C_2 C_4$$

и

$$\frac{T_д}{1 + k_1} + T_у = 2RC_4,$$

используя которые можем определить параметры RC-цепей через параметры исходной системы. Таким образом, схема на рис. 17-16, *в* реализует при минимальном числе операционных усилителей передаточную функцию всей последовательной цепи следящей системы.

2. Рассмотрим моделирование САР с релейным элементом [17-5].

Пусть задана система регулирования, которая описывается уравнениями

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d^2 y_2}{dt^2} + 2{,}5\frac{dy_2}{dt} + y_2 = -K_{y_1} \\ &y_1 = f(y_2) \end{aligned}\right\} \qquad (17.39)$$

и имеет начальные условия $y_1(0) = y_2(0) = 0$; $K = 100 \div 400$, где функция $f(y_2)$ имеет характеристику релейного действия (рис. 17-17, *а*). Такого типа характеристика свойственна элементу системы, который управляет исполнительными двигателями (ИД). Напряжение на зажимах

ИД может принимать только два значения — нуль или $U_{дв.макс}$ одной или другой фазы (рис. 17-17, *а*).

Структурная схема модели исходной системы (17.39) представлена на рис. 17-17, *б*.

Введя машинные переменные и коэффициенты передач k_{ij}, где i — номер используемого УПТ, а j — порядковый номер его входа, получим машинное уравнение вида

$$\frac{d^2U_3}{d\tau^2} = -k_{11}k_{21}k_{31}f(U_6) - k_{41}k_{13}k_{21}\frac{dU_3}{d\tau} - k_{12}k_{21}k_{31}U_3.$$

Проведем масштабирование машинного уравнения, используя масштабные соотношения $y_2 = M_{y_2}U_3$; $y_1 = M_{y_1}U_6$; $t = M_\tau\tau$:

$$\frac{d^2y_2}{dt^2} = -k_{11}k_{21}k_{31}\frac{M_{y_2}}{M_\tau^2}f\left(\frac{y_1}{M_{y_1}}\right) - k_{41}k_{13}k_{21}\frac{1}{M_\tau}\cdot\frac{dy_2}{dt} - k_{12}k_{21}k_{31}\frac{1}{M_\tau^2}y_2. \quad (17.40)$$

Для выполнения условий тождественности уравнений (17.39) и (17.40) необходимо соблюдение равенств, представленных для $M_{y_2} = M_{y_1}$ и $M_\tau = 1$:

$$k_{11}k_{21}k_{31} = K;$$
$$k_{41}k_{13}k_{21} = 2{,}5;$$
$$k_{12}k_{21}k_{31} = 1.$$

Ввиду того, что коэффициент K значительно отличается от остальных коэффициентов и не может быть реализован при наборе, необходимо выбрать другой масштаб времени.

Пусть $M_\tau = 5$, тогда коэффициенты передач можно определить из соотношений

$$k_{11}k_{21}k_{\ 1} = \frac{K}{25};$$
$$k_{41}k_{13}k_{21} = 0{,}5;$$
$$k_{12}k_{21}k_{31} = 0{,}04.$$

Например, при $K = 100$ могут быть выбраны следующие значения коэффициентов:

$$k_{41} = k_{31} = 1;$$
$$k_{21} = 0{,}4;\ k_{12} = 0{,}1;\ k_{13} = 1{,}25;\ k_{11} = 10.$$

Все полученные значения коэффициентов передач не превосходят предельных и могут быть набраны на модели МН-7.

Схема для воспроизведения релейной характеристики состоит (рис. 17-18) из двух решающих усилителей с диодными ограничителями в цепи обратной связи и суммирующего усилителя.

При отсутствии входного сигнала благодаря опорным напряжениям $\pm U_{оп}$, подведенным ко входам усилителей *5* и *7*, напряжение на выходе суммирующего усилителя *6* равно нулю. В процессе роста входного напряжения в сторону положительных или отрицательных значений наступает момент, когда на входе одного из входных усилите-

лей скачком изменяется полярность суммарного напряжения и на выходе схемы появляется напряжение. Благодаря положительной обратной связи (напряжение $U_{о. с}$) схема находится в устойчивом состоянии до следующей смены полярности суммарного входного напряжения.

3. Моделирование системы регулирования по отклонению на АВМ покажем на примере системы регулирования напряжения генератора,

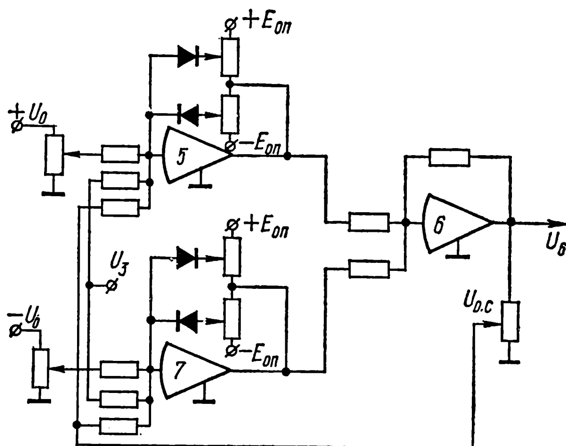


Рис. 17-18. Схема, моделирующая релейную характеристику рис. 17-17 *а*.

рассмотренной в гл. 13. Структурная схема этой системы регулирования (рис. 17-19) включает три звена с передаточными функциями $W_1(p)$, $W_2(p)$ и $W_3(p)$, охваченных отрицательной обратной связью

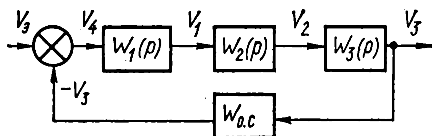


Рис. 17-19. Структура системы регулирования напряжения генератора.

$K_{о. с} = -1$, и входное звено сравнения, на которое подаются эталонное и выходное напряжения. Система регулирования описывается системой уравнений

$$\left.\begin{aligned}(T_1p+1)\,V_1 &= K_1V_4\\ (T_2p+1)\,V_2 &= K_2V_1\\ (T_3p+1)\,V_3 &= K_3V_2\\ V_4 &= V_э - V_3,\end{aligned}\right\} \qquad (17.41)$$

где V_1, V_2, V_3, V_4 — напряжения на выходах звеньев системы;

T_1, T_2, T_3 — постоянные времени звеньев системы (генератора, возбудителя, регулятора);

K_1, K_2, K_3 — коэффициенты усиления звеньев системы.

Моделирование заданной системы и ее решение можно провести либо по уравнению методом понижения порядка производной, применив его для общего дифференциального уравнения исходной системы или для исходной системы (17.41), либо методом структурного моделирования.

Для реализации моделирования общего дифференциального уравнения, описывающего систему регулирования, получим передаточную функцию для замкнутой системы в виде

$$\Phi(p = \frac{V_з(p)}{V_э(p)} = \frac{K_1K_2K_3}{(T_1p+1)(T_2p+1)(T_3p+1)+K_1K_2K_3}.$$

С учетом численных значений параметров системы:

$$K_1 = 0{,}35; \quad T_1 = 0{,}5 \text{ с};$$
$$K_2 = 1{,}13; \quad T_2 = 0{,}76 \text{ с};$$
$$K_3 = 25; \quad T_3 = 9{,}9 \text{ с}$$

запишем относительно старшей производной дифференциальное уравнение системы, заменив $V_з$ на y:

$$\frac{d^3y}{dt^3} = 2{,}62V_э - 3{,}42\frac{d^2y}{dt^2} - 2{,}98\frac{dy}{dt} - 2{,}9y.$$

Приведем это уравнение к универсальному виду, используя подстановку $y = y_1$; $\frac{dy_1}{dt} = y_2$ и т. д.:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = y_2 \\ \frac{dy_2}{dt} = y_3 \\ \frac{dy_3}{dt} = 2{,}62V_э - 3{,}42y_3 - 2{,}98y_2 - 2{,}9y_1 \end{cases}$$

и составим структурную схему модели (рис. 17-20, *а*).

Применяя метод структурного моделирования, получим схему, показанную на рис. 17-20, *б*. Соответствие модели и оригинала будет иметь место после масштабирования исходной передаточной функции каждого звена системы.

Рассматриваемую САР целесообразно моделировать, используя исходную систему уравнений (17.41).

Введя зависимые переменные y_i и независимую переменную t и учитывая исходные параметры системы, уравнения (17.41) получим в виде

$$\begin{cases} 0{,}5\frac{dy_1}{dt} + y_1 = 0{,}35y_4 \\ 0{,}76\frac{dy_2}{dt} + y_2 = 1{,}13y_1 \\ 9{,}9\frac{dy_3}{dt} + y_3 = 25y_2 \\ y_4 = y_0 - y_3, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \dfrac{dy_1}{dt} = 0{,}7y_4 - 2y_1 \\ \dfrac{dy_2}{dt} = 1{,}49y_1 - 1{,}32y_2 \\ \dfrac{dy_3}{dt} = 2{,}53y_2 - 0{,}101y_3 \\ y_4 = y_0 - y_3. \end{cases}$$

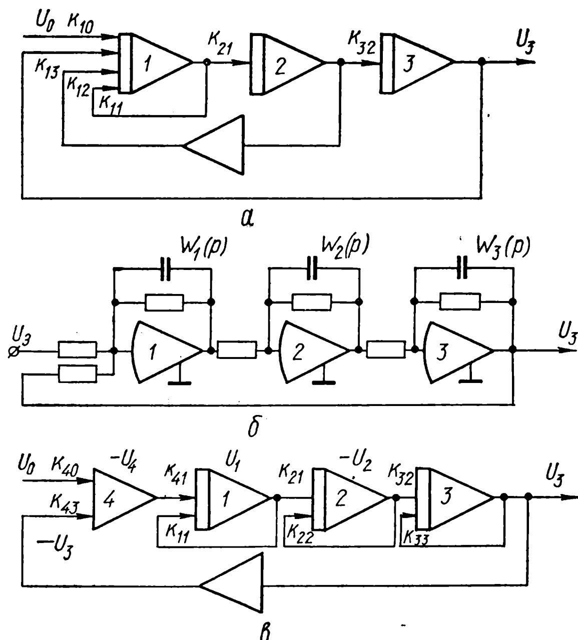


Рис. 17-20. Схемы моделирования системы регулирования напряжения генератора:

а — по дифференциальному уравнению; *б* — по структуре; *в* — по системе уравнений.

Масштабы представления зависимых величин определим исходя из известных максимальных значений этих переменных:

$$|y_1|_{\text{макс}} = 250; \quad |y_4|_{\text{макс}} = 242;$$
$$|y_2|_{\text{макс}} = 300; \quad |y_0|_{\text{макс}} = 242$$
$$|y_3|_{\text{макс}} = 275;$$

и требования обеспечения линейного диапазона УПТ, т. е.

$$M_1 = \frac{|y_1|_{\text{макс}}}{100} = 2{,}5; \quad M_3 = \frac{|y_3|_{\text{макс}}}{100} = 2{,}75;$$
$$M_2 = \frac{|y_2|_{\text{макс}}}{100} = 3{,}0; \quad M_4 = \frac{|y_4|_{\text{макс}}}{100} = 2{,}42;$$

$$M_0 = \frac{|y_0|_{\text{макс}}}{100} = 2,42.$$

Поскольку известно, что исследование необходимо проводить на отрезке времени $0 < t < 20$ с, что соответствует возможностям АВМ, и нет необходимости изменять скорость протекания процесса, выбираем $M_\tau = \frac{t}{\tau} = 1$.

Составим масштабированные машинные уравнения, приняв во внимание, что переменные y_i моделируются машинной величиной (напряжением), а реальное время t — машинным временем τ:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{dU_1}{d\tau} &= 0,7\frac{M_\tau M_4}{M_1}U_4 - 2M_\tau U_1\\
\frac{dU_2}{d\tau} &= 1,49\frac{M_\tau M_1}{M_2}U_1 - 1,32M_\tau U_2\\
\frac{dU_3}{d\tau} &= 2,53\frac{M_\tau M_2}{M_3}U_2 - 0,101M_\tau U_3\\
U_4 &= \frac{M_0}{M_4}U_0 - \frac{M_3}{M_4}U_3.
\end{aligned}\right\} \quad (17.42)$$

Структурная схема системы представлена на рис. 17-20, *в*, и ей соответствует система машинных уравнений

$$\left.\begin{aligned}
\frac{dU_1}{d\tau} &= k_{14}U_4 - k_{11}U_1\\
\frac{dU_2}{d\tau} &= k_{21}U_1 - k_{22}U_2\\
\frac{dU_3}{d\tau} &= k_{32}U_2 - k_{33}U_3\\
U_4 &= k_{40}U_0 - k_{43}U_3.
\end{aligned}\right\} \quad (17.43)$$

Следует заметить, что схему рис. 17-20, *в* можно упростить, исключив входной сумматор и инвертор цепи обратной связи при изменении знака входного напряжения U_0.

Сопоставляя системы (17.42) и (17.43), находим выражение для определения коэффициентов передач решающих блоков:

$$\begin{aligned}
k_{14} &= 0,7\frac{M_\tau M_4}{M_1}; & k_{32} &= 2,53\frac{M_\tau M_2}{M_3};\\
k_{11} &= 2M_\tau; & k_{33} &= 0,101M_\tau;\\
k_{21} &= 1,49\frac{M_\tau M_1}{M_2}; & k_{40} &= \frac{M_0}{M_4};\\
k_{22} &= 1,32M_\tau; & k_{43} &= \frac{M_3}{M_4},
\end{aligned}$$

которые после подстановки численных значений масштабов равны:

$$k_{14} = 0,678;\ k_{11} = 2;\ k_{21} = 1,24;$$
$$k_{22} = 1,32;\ k_{32} = 3,04;\ k_{33} = 0,101.$$
$$k_{40} = 1;\ k_{43} = 1,04.$$

Как видно, все значения коэффициентов передачи могут быть реализованы на модели МН-7.

Для набора модели решаемой задачи составляем рабочую структурную схему (рис. 17-21), на которой все обозначения проставлены применительно к модели МН-7, и карту настройки коэффициентов передач решающих блоков (табл. 13).

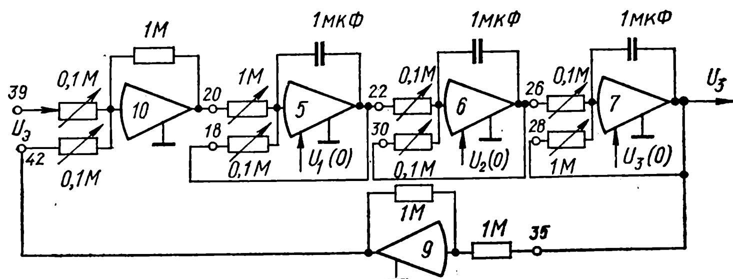


Рис. 17-21. Схема набора модели системы регулирования напряжения.

Таблица 13

Данные для настройки	k_{mn}							
	$k_{14}=0{,}678$	$k_{11}=2$	$k_{21}=1{,}24$	$k_{22}=1{,}32$	$k_{32}=3{,}04$	$k_{33}=0{,}101$	$k_{40}=1{,}0$	$k_{43}=1{,}04$
$N_{вх}$	20	18	22	30	26	28	39	42
$U_{вх}$	100	10	10	10	10	100	10	10
$U_{вых}$	67,8	20	12,4	13,2	30,4	10,1	10	10,4
$N_{УПТ}$	5	5	6	6	7	7	10	10

В данной задаче приняты нулевые начальные условия, поэтому

$$U_1(0) = U_2(0) = U_3(0) = 0.$$

Схема рис. 17-21 была реализована на модели МН-7. Результаты моделирования (решения) регистрировались через равные интервалы времени и измерялись компенсационным методом. Полученные значения по всем переменным сведены в табл. 14.

Таблица 14

U, В	τ, с							
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
U_3	100,0	75,0	69,8	81,4	73,5	75,0	77,0	77,0
$\lvert U_2\rvert$	8,1	4,0	4,0	4,0	2,05	2,05	2,05	2,05
$\lvert U_1\rvert$	2,3	2,3	4,1	4,1	2,1	2,1	2,1	2,1
$\lvert U_4\rvert$	21,2	6,5	9,0	8,5	8,0	6,5	6,5	6,5

Кроме того, процесс решения регистрировался также электронно-лучевым индикатором. Одна из реализации переходного процесса представлена на рис. 17-22.

Оценим качество переходного процесса САР по виду ее переходной функции, полученной посредством АВМ. Во-первых, делаем заключение, что рассматриваемая САР устойчива, поскольку переходный процесс затухает. При этом основная частота колебания равна 0,13 Гц, а количество колебаний вокруг установившегося значения равно 2. Во-вторых, определяем основные показатели качества исследуемого процесса, а именно: время регулирования $t_р$ и относительное перерегулирование σ в процентах.

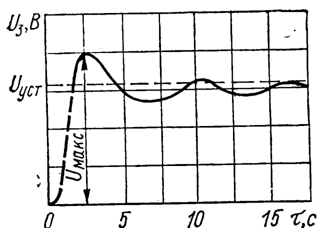


Рис. 17-22. Машинная реализация переходного процесса САР.

Время регулирования определяется длительностью переходного процесса до момента, когда отклонение регулируемой величины не будет превышать допустимых пределов — $\varepsilon = 2—3\%$ установившегося значения.

В данном случае имеем $t_р = 14{,}5$ с. Величина относительного перерегулирования

$$\sigma\% = \frac{U_{макс} - U_{уст}}{U_{уст}} \cdot 100 = 30\%.$$

Числовые значения времени регулирования и относительного перерегулирования можно использовать как исходные данные для синтеза корректирующих устройств, если возникает необходимость уменьшить колебания регулируемой величины в переходном процессе.

Приложение I

РАСЧЕТ АКТИВНО-ЕМКОСТНОГО ФИЛЬТРА НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФАЗ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Из фильтров напряжения обратной последовательности фаз наибольшее распространение получили однофазные фильтры, у которых при подведении на вход трехфазной системы напряжений на выходе получается одно напряжение, пропорциональное напряжению обратной последовательности фаз первичной цепи.

В настоящее время имеется много разновидностей этих фильтров, отличающихся составом элементов и схемами их соединения. Для облегчения сравнения и выбора фильтры делят [П-1] на классы, отличающиеся между собой характером составных элементов и построением схем. Классы делят на группы, отличающиеся схемой соединения элементов. Группы в свою очередь делят на типы, которые отличаются соотношением величин входящих в них элементов.

Выбор фильтра производится на основе сравнения основных показателей фильтра:

1. Отношение максимальной мощности $S_{р.\,макс}$, отдаваемой фильтром при некоторой величине подведенного напряжения U_2, к полной мощности $S_{потр}$ (в ВА), потребляемой фильтром при подведении к его первичным зажимам напряжения $U_1 = U_2$, т. е. показатель

$$\alpha = \frac{S_{р.\,макс}}{S_{потр}}.$$

2. Отношение максимальной мощности $S_{р.\,макс}$, отдаваемой фильтром при некоторой величине подведенного напряжения U_2, к потерям активной мощности $S_{пот}$ в фильтре при подведении к его первичным зажимам напряжения $U_1 = U_2$, т. е. показатель

$$\beta = \frac{S_{р.\,макс}}{S_{пот}}.$$

3. Отношение первичного напряжения небаланса $dU_{нб}$, обусловленного отклонением частоты f от расчетной $f_н$ при некотором напряжении прямой последовательности U_1, к этому напряжению U_1 и относительному отклонению частоты $\frac{\partial f}{f_н}$, т. е. показатель

$$\gamma_f = \frac{\partial U_{нб}}{U_1 \frac{\partial f}{f_н}} = \frac{\partial U_{нб} f_н}{\partial f U_1}.$$

При прочих равных условиях фильтр получается тем лучше, чем больше его показатели α и β и чем меньше показатель γ_f.

В настоящее время в СССР широко применяются фильтры напряжения обратной последовательности фаз с двумя активно-емкостными плечами, имеющие удовлетворительные показатели α, β и особенно γ_f и отличающиеся простотой их конструктивного оформления. Принципиальная схема фильтра, относящегося к данной группе, показана на рис. П-1,*а*. К выходным зажимам *mn* фильтра присоединена нагрузка в виде реле, поэтому эта схема называется схемой фильтр-реле напряжения обратной последовательности фаз.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

На рис. П-1 показаны потенциальные диаграммы фильтра при подведении к его первичным зажимам системы напряжений прямой (рис. П-1, *б*) и обратной (рис. П-1, *в*) последовательностей фаз в режиме холостого хода, т. е. при отключенном реле. По сопротив-

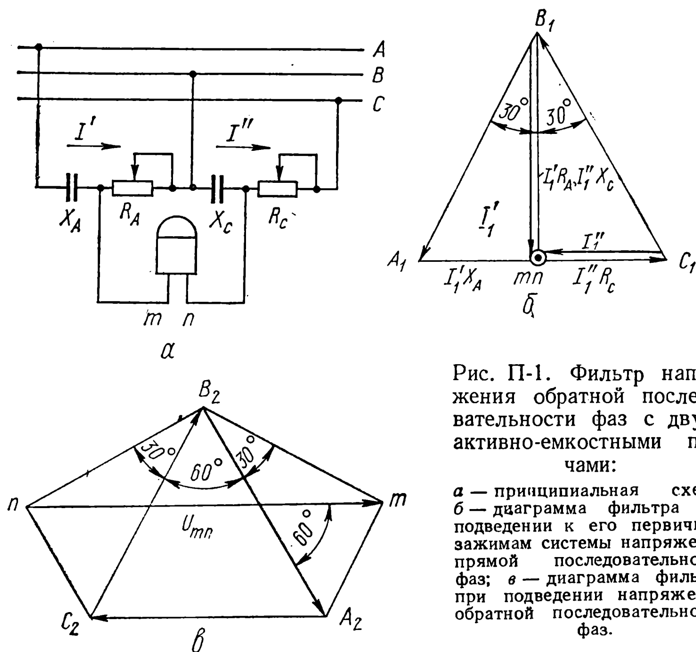


Рис. П-1. Фильтр напряжения обратной последовательности фаз с двумя активно-емкостными плечами:

а — принципиальная схема; *б* — диаграмма фильтра при подведении к его первичным зажимам системы напряжений прямой последовательности фаз; *в* — диаграмма фильтра при подведении напряжений обратной последовательности фаз.

лениям R и X каждого из двух плеч фильтра A (X_A, R_A) и C (X_C, R_C) протекает один и тот же ток (I' или I''). По положению совмещенной точки *mn* на диаграмме (рис. П-1, *б*) легко определить соотношения падений напряжения на сопротивлениях данного плеча, а следовательно, и соотношения самих этих сопротивлений

$$X_A : R_A = \frac{1}{2} : \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ и } X_C : X_C = \frac{\sqrt{3}}{2} : \frac{1}{2}.$$

В том случае, когда полные сопротивления плеч равны между собой, т. е. когда $z_C = z_A$, составляющие сопротивлений плеч могут быть выражены через одну из них, например через составляющую X_A, следующим образом:

$$R_A = \sqrt{3}X_A;\ X_C = \sqrt{3}X_A;\ R_C = X_A. \qquad (\text{П.1})$$

В более общем случае, когда сопротивления плеч фильтра не равны между собой, т. е. когда $z_C = kz_A$, соответствующие соотношения

$$R_A = \sqrt{3}X_A;\ X_C = k\sqrt{3}X_A;\ R_C = kX_A. \qquad (\text{П.2})$$

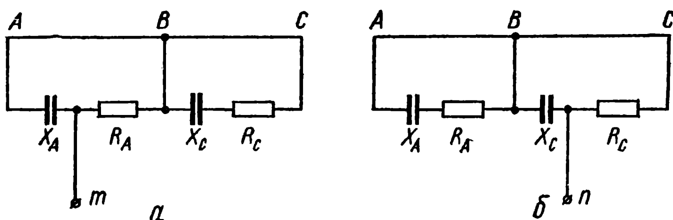


Рис. П-2. Сопротивление короткого замыкания фильтра:
а — сопротивление $z_{к.\,фA}$, определяемое между зажимом *m* и закороченными зажимами *А, Б, С*; *б* — сопротивление $z_{к.\,фC}$, определяемое между зажимом *n* и закороченными зажимами *А, В* и *С*.

Сопротивление короткого замыкания $Z_{к.\,ф}$ рассматриваемого фильтра состоит из двух частей:

$$Z_{к.\,ф} = Z_{к.\,фA} + Z_{к.\,фC},$$

где $Z_{к.\,фA}$ — сопротивление между зажимом *m* и закороченными зажимами *А*, *В* и *С* (рис. П-2, *а*): $Z_{к.фC}$ — сопротивление между зажимом *n* и закороченными зажимами *А*, *В* и *С* (рис. П-2, *б*).

Так как сопротивления $Z_{к.\,фA}$ и $Z_{к.\,фC}$ в схеме рис. П-2 выражаются соответственно через сопротивления X_A, R_A и X_C, R_C, которые, в свою очередь, по соотношению (П.1) или (П.2) могут быть выражены через одну составляющую, в данном случае через X_A, то и сопротивление $Z_{к.\,ф}$ может быть выражено через эту же составляющую.

При $k \neq 1$ все сопротивления фильтра с учетом соотношения (П.2) могут быть представлены в комплексной плоскости через емкостное сопротивление $X_A = -jx_A$ в виде

$$R_A = -jx_A\sqrt{3}e^{j90°} = \sqrt{3}x_A;\ X_C = -jx_Ak\sqrt{3};$$
$$R_C = -jx_Ake^{j90°} = kx_A.$$

Тогда

$$Z_{к.\,ф} = Z_{к.\,фA} + Z_{к.\,фC} = \frac{X_AR_A}{X_A + R_A} + \frac{X_CR_C}{X_C + R_C} = \frac{-j\sqrt{3}x_A}{-j+\sqrt{3}} +$$
$$+ \frac{-j\sqrt{3}x_Ak}{-j\sqrt{3}+1} = -j\sqrt{3}x_A\left(\frac{1}{\sqrt{3}-j} + \frac{k}{1-j\sqrt{3}}\right),$$

или после простых преобразований

$$Z_{к.\,ф} = 0{,}433x_A[1 + k\sqrt{3} - j(\sqrt{3} + k)]. \tag{П.3}$$

Рассматриваемый фильтр напряжения обратной последовательности фаз (рис. П-1) в соответствии с существующей [П-1] классификацией относится к классу 2, группа б. К этой группе относятся два типа фильтров, один из которых выполняется при $k = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}58$, а другой — при $k = 1$.

Применительно к фильтру с $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$ выражение (П.3) преобразуется следующим образом:

$$Z_{к.\,ф} = 0{,}433x_A\left[1 + 1 - j\left(\sqrt{3} + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\right] = 0{,}433x_A(2 -$$
$$- j2{,}31) = 0{,}433 \cdot 3{,}05x_A e^{-j49^\circ} = 1{,}32x_A e^{-j49^\circ},$$

что может быть представлено также в виде

$$Z_{к.\,ф} = 1{,}32x_A e^{-j49^\circ} = z_{к.\,ф} e^{j\gamma_ф},$$

откуда

$$\left.\begin{aligned} z_{к.\,ф} &= 1{,}32x_A; \\ \gamma_ф &= -49^\circ, \end{aligned}\right\} \tag{П.4}$$

где $\gamma_ф$ — угол сопротивления фильтра.

При $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$ соотношения (П.2) принимают вид

$$R_A = \sqrt{3}X_A;\ X_C = X_A;\ R_C = \frac{1}{\sqrt{3}}X_A. \tag{П.5}$$

Заметим, что значения x_A в равенстве (П.4) и X_A в (П.5) численно равны между собой.

Применительно к фильтру с $k = 1$ выражение (П.3) преобразуется следующим образом:

$$Z_{к.\,ф} = 0{,}433x_A[1 + \sqrt{3} - j(\sqrt{3} + 1)] = 0{,}433x_A \times$$
$$\times (2{,}73 - j2{,}73) = 0{,}433 \cdot 2{,}73x_A(1 - j) = 1{,}66x_A e^{-j45^\circ},$$

что может быть представлено также в виде

$$Z_{к.\,ф} = 1{,}66x_A e^{-j45^\circ} = z_{к.\,ф} e^{j\gamma_ф},$$

откуда

$$\left.\begin{aligned} z_{к.\,ф} &= 1{,}66x_A; \\ \gamma_ф &= -45^\circ. \end{aligned}\right\} \tag{П.6}$$

При $k = 1$ соотношения (П.2) принимают вид соотношений (П.1). Значения x_A в выражении (П.6) и X_A в (П.1) численно равны между собой.

Для фильтров с $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$ и $k = 1$ показатели фильтра соответственно следующие [П-1]:

$$\alpha = 0{,}96;\ \beta = 1{,}46;\ \gamma_f = 0{,}29$$

и

$$\alpha = 0{,}94;\ \beta = 1{,}33;\ \gamma_f = 0{,}29,$$

т. е. несколько лучшие показатели имеет фильтр с $k = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}58.$

При наличии на первичной стороне фильтра составляющей напряжения обратной последовательности фаз и включении на зажимы *mn* нагрузки в виде реле (рис. П-1) через него потечет ток. Этот ток может быть определен из выражения

$$\dot{I}_р = \frac{\dot{U}_{х.\,х}}{Z_р + Z_{к.\,ф}} = \frac{\dot{m}_{х.\,х}\dot{U}_2}{Z_р + Z_{к.\,ф}}, \qquad (П.7)$$

где $\dot{U}_{х.\,х}$ — напряжение $\dot{U}_{mn}$ (рис. П-1, *в*), являющееся при отсутствии нагрузки напряжением холостого хода; $\dot{m}_{х.\,х}$ — коэффициент пропорциональности, называемый отношением холостого хода. На основании рис. П-1, *в*

$$\dot{m}_{х.\,х} = \frac{\dot{U}_{х.\,х}}{\dot{U}_2} = 1{,}5e^{j60} \text{ и } m_{х.\,х} = \frac{U_{х.\,х}}{U_2} = 1{,}5,$$

$Z_р$ — полное сопротивление реле.

Напряжение на зажимах *mn* фильтра

$$\dot{U}_р = \dot{I}_р\dot{Z}_р = \frac{\dot{m}_{х.\,х}\dot{U}_2}{Z_р + Z_{к.\,ф}} Z_р. \qquad (П.8)$$

О чувствительности схемы фильтр-реле (рис. П-1, *а*) можно судить по мощности на реле. Полную мощность, отдаваемую фильтром в обмотку реле, определим с учетом выражения (П.8). Учитывая при этом, что скалярным произведением некоторых векторов $\dot{A}$ и $\dot{B}$ является скалярная величина

$$AB\cos(\dot{A}, \dot{B}),$$

где $(\dot{A}, \dot{B})$ — угол между векторами $\dot{A}$ и $\dot{B}$, и учитывая, что квадрат абсолютного значения вектора равен его скалярному произведению самого на себя, получаем

$$S_р = \frac{U_р^2}{z_р} = \frac{m_{х.\,х}^2 U_2^2}{|Z_р + Z_{к.\,ф}|^2} z_р = \frac{m_{х.\,х}^2 U_2^2}{z_р + 2z_{к.\,ф}\cos(\gamma_ф - \gamma_р) + \frac{z_{к.\,ф}^2}{z_р}}, \qquad (П\text{-}9)$$

где $(\gamma_ф - \gamma_р)$ — разность между углами сопротивлений фильтра и реле.

Максимальная мощность $S_{р. макс}$, отдаваемая фильтром, будет при минимальном значении знаменателя выражения (П.9). Взяв производную знаменателя по $z_р$ (с учетом того, что угол $\gamma_р$ при изменении обмоточных данных реле остается примерно постоянным) и приравняв ее нулю, получим

$$1 - \frac{z^2_{к. ф}}{z^2_р} = 0,$$

откуда

$$z_р = z_{к. ф}. \qquad (П.10)$$

Подставляя в равенство (П.9) значение сопротивления реле из выражения (П.10), получаем выражение для отдаваемой фильтром максимальной мощности в виде

$$S_{р. макс} = \frac{m^2_{х. х} U^2_2}{2z_{к. ф}[1 + \cos(\gamma_ф - \gamma_р)]},$$

или в условиях срабатывания, когда мощность $S_{р. макс}$ является мощностью срабатывания реле $S_{ср}$, а напряжение обратной последовательности U_2 — напряжением срабатывания схемы $U_{с. с}$, находим

$$S_{ср} = \frac{m^2_{х. х} \cdot U^2_{с. с}}{2z_{к. ф}[1 + \cos(\gamma_ф - \gamma_р)]},$$

откуда

$$z_{к. ф} = z_р = \frac{m^2_{х. х} \cdot U^2_{с. с}}{2S_{ср}[1 + \cos(\gamma_ф - \gamma_р)]}. \qquad (П.11)$$

Если в схеме фильтр-реле применяется электромагнитное реле, типа РТ, то число витков w его обмотки, которое обеспечит требуемую чувствительность схемы, может быть определено из известного соотношения

$$w = 100\sqrt{z_р}. \qquad (П.12)$$

Определив по справочным данным [П-2, табл. С-4] сечение окна катушки $q_к$, можно найти диаметр провода катушки из выражения

$$d = \sqrt{\frac{4k_з q_к}{\pi w}}, \qquad (П.13)$$

где $k_з$ — коэффициент заполнения, зависящий от способа намотки, вида изоляции и диаметра провода [П-2, рис. С-1].

Коэффициент заполнения $k_з$ относительно мало изменяется с изменением диаметра провода, что позволяет для его определения применить метод последовательных приближений.

Обозначив через $U_н$ междуфазное номинальное напряжение на входе фильтра, можно определить токи в плечах фильтра (рис. П-1)

$$I' = \frac{U_н}{\sqrt{X^2_A + R^2_A}} \quad \text{и} \quad I'' = \frac{U_н}{\sqrt{X^2_C + R^2_C}}. \qquad (П.14)$$

Зная токи I' и I'' и сопротивления R_A и R_C, можно определить мощности рассеивания активных сопротивлений

$$P_A = I'^2 R_A \text{ и } P_C = I''^2 R_C, \tag{П.15}$$

необходимые для выбора мощностей сопротивлений фильтра.

РАСЧЕТ СХЕМЫ ФИЛЬТР-РЕЛЕ

По приведенным соотношениям можно выполнить расчет фильтра, который предварительно должен быть выбран в соответствии с его назначением. Порядок расчета зависит от исходных данных:

1) напряжения небаланса $U_{2нб}$ или напряжения срабатывания схемы $U_{с. с}$;

2) типа реле (обычно РТ), его мощности срабатывания $S_{ср}$ и угла сопротивления обмотки $\gamma_р$;

3) междуфазного напряжения $U_н$ на входе фильтра.

Расчет схемы фильтр-реле сводится в основном к определению параметров фильтра и обмоточных данных реле, при которых обеспечивается требуемая чувствительность схемы.

Пример. *Дано:* к фильтру напряжения обратной последовательности фаз, предназначенного для использования в схеме блокировки релейной защиты от качаний, подлючено реле типа РТ с потребляемой мощностью при срабатывании $S_{ср} = 0{,}1$ ВА. Угол сопротивления обмотки данного реле, как и большинства других реле этого типа, $\gamma_р \approx 60°$. Коэффициент возврата реле $k_в = 0{,}85$. Напряжение небаланса схемы фильтр-реле, обусловленное погрешностями измерительного трансформатора напряжения, самого фильтра и возможными отклонениями частоты при качаниях, ориентировочно принимаем $U_{2нб} = 4$ В. Междуфазное напряжение на входе фильтра $U_н = 220$ В.

Требуется: 1. Выбрать тип фильтра и рассчитать его параметры.

2. Исходя из условий оптимальной нагрузки ($z_р = z_{к. ф}$), рассчитать обмоточные данные реле.

3. В соответствии с полученными данными расчета наметить типы конденсаторов и стандартных резисторов для выполнения фильтра.

Решение. Принимаем фильтр напряжения обратной последовательности с активно-емкостными сопротивлениями плеч с коэффициентом $k = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}58$. Этот фильтр имеет, как было указано, более высокие показатели качества α и β, чем фильтр с $k = 1$. Частотный показатель γ_f от значения k не зависит.

Напряжение срабатывания схемы фильтр-реле с учетом коэффициента возврата

$$U_{с. с} = \frac{U_{2нб}}{k_в} = \frac{4{,}0}{0{,}85} = 4{,}7 \text{ В}.$$

По выражению (П.11) сопротивление фильтра, равное сопротивлению обмотки реле, с учетом значения угла сопротивления $\gamma_ф$ фильтра по (П.4)

$$z_{к. ф} = z_р = \frac{m^2_{х. х} U^2_{с. с}}{2S_{ср}\,[1 + \cos(\gamma_ф - \gamma_р)]} = \frac{1{,}5^2 \cdot 4{,}7^2}{2 \cdot 0{,}1\,[1 + \cos(-49° - 60°)]},$$

и так как

$$\cos(-109°) = \cos 109° = -\sin 19° = -0{,}326,$$

то

$$z_{к.\ ф} = z_р = \frac{1{,}5^2 \cdot 4{,}7^2}{2 \cdot 0{,}1\,(1-0{,}326)} = 370 \text{ Ом}.$$

Тогда, с учетом равенства (П.4), сопротивление емкости в плече A фильтра

$$x_A = \frac{z_{к.\ ф}}{1{,}32} = \frac{370}{1{,}32} = 280 \text{ Ом}.$$

Соответствующая этому сопротивлению емкость

$$C_A = \frac{1}{\omega x_A} 10^6 = \frac{10^6}{314 \cdot 280} = 11{,}35 \text{ мкФ}.$$

Принимаем емкость $C_{Aрасч} = 10$ мкФ, которой соответствует расчетное значение сопротивления

$$x_{Aрасч} = \frac{10^6}{\omega C_{Aрасч}} = \frac{10^6}{314 \cdot 10} = 319 \text{ Ом}.$$

Остальные сопротивления фильтра определятся по соотношению (П.5):

$$R_{Aрасч} = \sqrt{3} x_{Aрасч} = \sqrt{3} \cdot 319 = 550 \text{ Ом};$$

$$R_{Cрасч} = \frac{1}{\sqrt{3}} x_{Aрасч} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 319 = 184 \text{ Ом};$$

$$x_{Cрасч} = x_{Aрасч}.$$

Следовательно, расчетная емкость в плече C фильтра $C_{Cрасч} = 10$ мкФ.

Расчетное значение сопротивления фильтра и реле

$$z_{к.\ ф.\ расч} = z_{р.\ расч} = 1{,}32 x_{Aрасч} = 1{,}32 \cdot 319 = 420 \text{ Ом}.$$

Для реле РТ число витков каждой из двух его катушек определим по равенству (П.12)

$$w = 100 \cdot \sqrt{z_{р.\ расч}} = 100\sqrt{420} = 2050 \text{ витков}.$$

По справочным данным [П-2 (табл. C-4)] сечение окна катушки реле типа РТ при полном его заполнении $q_к = 254$ мм². Задаваясь в первом приближении коэффициентом заполнения $k_з = 0{,}5$, по равенству (П.13) находим предварительно

$$d = \sqrt{\frac{4k_з q_к}{\pi w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}5 \cdot 254}{\pi 2050}} = 0{,}28 \text{ мм}$$

и по справочным таблицам [П-2 (табл. C-1)] выбираем марку провода ПЭЛ. По справочным кривым [П-2 (рис. C-1)] для $d = 0{,}28$ мм находим коэффициент заполнения $k_з = 0{,}54$ и по равенству (П.13) уточняем диаметр провода

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}54 - 254}{\pi \cdot 2050}} = 0{,}29 \text{ мм}.$$

Дальнейших уточнений не требуется и поэтому принимаем $d_{расч} = 0{,}29$ мм.

В соответствии с полученными данными расчета намечаем типы конденсаторов и сопротивлений фильтра. В качестве емкостей $C_{Aрасч}$ и $C_{Cрасч}$ можно принять малогабаритные металлобумажные конденсаторы, смонтированные в прямоугольных металлических корпусах [П-3].

Так как для металлобумажных конденсаторов допустимое действующее значение переменного напряжения (50 Гц) составляет всего 35—40% рабочего напряжения $U_{раб}$, определяемого при постоянном напряжении, то для работы на переменном напряжении 220 В следует выбирать конденсаторы на $U_{раб} = 600$ В. При этом каждую из емкостей $C_{A расч}$ и $C_{C расч}$ можно набрать, например, из трех конденсаторов: два конденсатора по 4 мкФ и один 2 мкФ. Размеры первого габарита $50 \times \times 45 \times 50$, а второго —$50 \times 45 \times 30$ мм.

Токи I' и I'' в плечах фильтра определяем по равенствам

$$I' = \frac{U_н}{\sqrt{x^2_{A расч} + R^2_{A расч}}} = \frac{220}{\sqrt{319^2 + 550^2}} = 0{,}347 \text{ А}$$

и

$$I'' = \frac{U_н}{\sqrt{x^2_{C расч} + R^2_{C расч}}} = \frac{220}{\sqrt{319^2 + 184^2}} = 0{,}6 \text{ А.}$$

Тогда определяемые по равенству (П.15) мощности рассеивания, поглощаемые сопротивлениями,

$$P_A = I'^2 R_{A расч} = 0{,}347^2 \cdot 550 = 66{,}2 \text{ Вт}$$

$$P_C = I''^2 R_{C расч} = 0{,}6^2 \cdot 184 = 66{,}3 \text{ Вт.}$$

Для изготовления сопротивлений могут быть использованы стандартные проволочные эмалированные сопротивления с мощностью рассеивания не меньше расчетной, т. е. не меньше 66,3 Вт.

По данным каталога [П-4] этому условию соответствует V тип сопротивлений с максимальной мощностью рассеивания 88 Вт. При этом в качестве основной части сопротивления $R_{A расч}$ можно принять стандартное сопротивление 500 Ом на ток 420 мА и в дополнение к нему намотать добавочное сопротивление, несколько превышающее 50 Ом и служащее для плавной регулировки сопротивлений фильтра; в качестве основной части сопротивления $R_{C расч}$ можно принять стандартное сопротивление 150 Ом на ток 770 мА и в дополнение к нему намотать добавочное сопротивление, несколько превышающее 34 Ом и также служащее для плавной регулировки.

Числовой пример расчета фильтра с $k = 1$ опускаем, так как он выполняется так же, как и рассмотренный пример расчета с $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$. Разница была бы только в использовании соответственно других соотношений, оговоренных во вступительной части расчета.

Приложение II

РАСЧЕТ АКТИВНО-ЕМКОСТНОГО ФИЛЬТРА ТОКА ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФАЗ ДЛЯ СИСТЕМЫ БЕЗ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как известно, в целях упрощения на вход фильтра тока обратной последовательности фаз подводят токи с исключенной составляющей нулевой последовательности. Назначение фильтра при этом облегча-

ется и сводится к исключению только составляющей прямой последовательности фаз. Сюда относятся фильтры, на вход которых подводятся либо разности фазных токов, не содержащие составляющих тока нулевой последовательности, либо фазные токи с компенсированной с помощью промежуточных устройств составляющей нулевой последовательности. Фильтры тока обратной последовательности фаз могут подключаться и непосредственно на измерительные трансформаторы тока, если в системе токи нулевой последовательности отсутствуют (сеть небольшой протяженности с изолированной нейтралью или компенсированная).

Применительно к этим условиям ниже рассматривается фильтр тока обратной последовательности фаз в активно-емкостном исполнении. Аналогичный фильтр в активно-индуктивном исполнении рассмотрен в литературе [П-5].

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Поскольку в рассматриваемом случае ток нулевой последовательности фаз равен нулю, т. е.

$$3\dot{I}_{A0} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C,$$

то равным нулю будет и выражение

$$-a^2 (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0.$$

Тогда известное уравнение для тока обратной последовательности фаз

$$3\dot{I}_{A2} = \dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C$$

можно преобразовать следующим путем:

$$3\dot{I}_{A2} = \dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C - a^2\dot{I}_A - a^2\dot{I}_B - a^2\dot{I}_C =$$
$$= (1 - a^2)\,\dot{I}_A + (a - a^2)\,\dot{I}_C = \sqrt{3}e^{j30}\dot{I}_A + \sqrt{3}e^{j90}\dot{I}_C,$$

или, умножая все уравнение на $\frac{1}{\sqrt{3}}e^{-j90}$, получим

$$\sqrt{3}e^{-j90}\dot{I}_{A2} = e^{-j60}\dot{I}_A + \dot{I}_C. \qquad (П.16)$$

Из выражения (П.16) следует, что для получения фильтра тока обратной последовательности $\dot{I}_{A2}$ в рассматриваемом случае потребуется применить лишь два измерительных трансформатора тока в фазах A и C.

Для перехода к падениям напряжения, пропорциональным этим токам, умножим обе части уравнения (П.16) на некоторое сопротивление z_C, получая при этом

$$\sqrt{3}e^{-j90}\dot{I}_{A2}z_C = e^{-j60}\dot{I}_A z_C + \dot{I}_C z_C,$$

или

$$\sqrt{3}e^{-j90}\dot I_{A2}z_C = \dot I_A z_A + \dot I_C z_C, \tag{П.17}$$

где

$$z_A = z_C e^{-j60}.$$

Схема для получения этих падений напряжения, выполненная с помощью двух трансформаторов тока и двух сопротивлений z_A и z_C, приведена на рис. П-3.

Показанные на схеме направления токов принимаем за положительные. Тогда на основе законов Кирхгофа уравнения токов для узлов *1* и *2* соответственно будут

$$\dot I'_A + \dot I_{mn} - \dot I_A = 0 \tag{П.18}$$

и

$$\dot I_C - \dot I'_C - \dot I_{mn} = 0, \tag{П.19}$$

а уравнение падений напряжения в контуре сопротивлений z_A, z_C и накладки mn запишется в виде

$$\dot I'_A z_A + \dot I'_C z_C = \dot I_{mn} z_{mn},$$

но поскольку $z_{mn} = 0$, то это уравнение будет

$$\dot I'_A z_A = -\dot I'_C z_C.$$

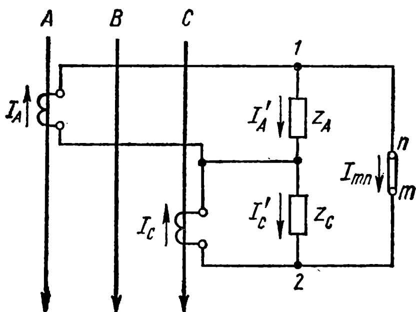


Рис. П-3. Принципиальная схема фильтра тока обратной последовательности.

Подставляя далее значения соответствующих токов из (П.18) и (П.19), получим

$$(\dot I_A - \dot I_{mn})\, z_A = -(\dot I_C - \dot I_{mn})\, z_C, \tag{П.20}$$

или

$$\dot I_A z_A + \dot I_C z_C = \dot I_{mn}(z_A + z_C),$$

откуда

$$\dot I_{mn} = \frac{\dot I_A z_A + \dot I_C z_C}{z_A + z_C},$$

или, подставляя значение $z_A = z_C e^{-j60}$, получим

$$\dot I_{mn} = \frac{\dot I_A z_C e^{-j60} + \dot I_C z_C}{z_C e^{-j60} + z_C},$$

т. е.

$$\dot I_{mn} = \frac{\dot I_A e^{-j60} + \dot I_C}{e^{-j60} + 1}. \tag{П.21}$$

Подведем на схему рис. П-3 симметричную систему токов прямой последовательности фаз $\dot I_{A1}$, $\dot I_{B1}$, $\dot I_{C1}$. Тогда уравнение (П.21) принимает вид

$$\dot I_{mn} = \frac{\dot I_{A1} e^{-j60} + \dot I_{C1}}{e^{-j60} + 1}. \tag{П.22}$$

Выразим вектор $\dot I_{C1}$ через вектор $\dot I_{A1}$, т. е.

$$\dot I_{C1} = \dot I_{A1} e^{j120}.$$

Тогда [П-6]

$$\dot I_{mn} = \frac{\dot I_{A1} e^{j60} + \dot I_{A1} e^{j120}}{e^{-j60} + 1} = \frac{\dot I_{A1} (e^{-j60} + e^{j120})}{e^{-j60} + 1} =$$
$$= \dot I_{A1} \frac{\cos 60^\circ - j \sin 60^\circ + \cos 120^\circ - j \sin 120^\circ}{\cos 60^\circ - j \sin 60^\circ + 1} =$$
$$= \dot I_{A1} \frac{0{,}5 - j0{,}865 - 0{,}5 + j0{,}865}{0{,}5 - j0{,}865 + 1},$$

и поскольку числитель в правой части выражения равен нулю, то

$$\dot I_{mn} = 0. \tag{П.23}$$

Следовательно, ток прямой последовательности в накладке *mn* не протекает.

Подведем на схему симметричную систему токов обратной последовательности фаз $\dot I_{A2}$, $\dot I_{B2}$, $\dot I_{C2}$. Тогда уравнение (П.21) принимает вид

$$\dot I_{mn} = \frac{\dot I_{A2} e^{-j60} + \dot I_{C2}}{e^{-j60} + 1}. \tag{П.24}$$

Подобно тому, как это было сделано при рассмотрении системы токов прямой последовательности фаз, выразим вектор тока $\dot I_{C2}$ через вектор $\dot I_{A2}$, т. е.

$$\dot I_{C2} = \dot I_{A2} e^{-j120}.$$

Тогда

$$\dot I_{mn} = \frac{\dot I_{A2} e^{-j60} + \dot I_{A2} e^{-j120}}{e^{-j60} + 1} = \frac{\dot I_{A2} (e^{-j60} + e^{-j120})}{e^{-j60} + 1} =$$
$$= \dot I_{A2} \frac{\cos 60^\circ - j \sin 60^\circ + \cos 120^\circ - j \sin 120^\circ}{\cos 60^\circ - j \sin 60^\circ + 1} =$$
$$= \dot I_{A2} \frac{0{,}5 - j0{,}865 - 0{,}5 - j0{,}865}{0{,}5 - j0{,}865 + 1} = \dot I_{A2} \frac{-j2 \cdot 0{,}865}{1{,}5 - j0{,}865}.$$

Избавляясь далее от мнимости в знаменателе и сокращая, получим

$$\dot I_{mn} = \frac{-j2 \cdot 0{,}865\,(1{,}5 + j0{,}865)}{(1{,}5 - j0{,}865)(1{,}5 + j0{,}865)},$$

т. е.

$$\dot I_{mn} = \dot I_{A2} \frac{2 \cdot 0{,}865\,(0{,}865 - j1{,}5)}{3{,}0},$$

или окончательно

$$\dot{I}_{mn} = \dot{I}_{A2}(0,5 - j0,865),$$

или, что то же,

$$\dot{I}_{mn} = \dot{I}_{A2}e^{-j60} = \dot{I}_2 e^{-j60}, \qquad (\text{П.25})$$

где ток $\dot{I}_2$ отнесен к фазе A.

Ток, полученный по (П.25), и его фазовое положение показаны на диаграмме рис. П-4.

Можно далее написать, что на выходе фильтра ток

$$\dot{I}_{mn} = \dot{I}_{\text{к. з}} = \dot{m}_{\text{к. з}}\dot{I}_2,$$

где $\dot{m}_{\text{к. з}}$ — отношение короткого замыкания.

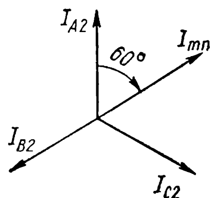


Рис. П-4. Фазовое положение вектора тока обратной последовательности, протекающего в накладке на выходе фильтра.

Векторное и абсолютное значения этого коэффициента будут

$$\left.\begin{aligned} \dot{m}_{\text{к. з}} &= \frac{\dot{I}_{\text{к. з}}}{\dot{I}_2} = e^{-j60} \\ &\text{и} \\ m_{\text{к. з}} &= \frac{I_{\text{к. з}}}{I_2} = 1. \end{aligned}\right\} \qquad (\text{П.26})$$

Зная из диаграммы положение вектора тока $\dot{I}_{mn}$ (рис. П-4), находим ток обратной последовательности в векторном и абсолютном значениях:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{I}_{mn}}{\dot{m}_{\text{к. з}}} = \frac{\dot{I}_{mn}}{e^{-j60}} = \dot{I}_{mn}e^{j60} \\ &\text{и} \\ I_2 &= \frac{I_{mn}}{m_{\text{к. з}}} = \frac{\dot{I}_{mn}}{1,0} = I_{mn}. \end{aligned}\right\} \qquad (\text{П.27})$$

РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРА

Для получения фильтра тока обратной последовательности по схеме рис. П-3 необходимо изготовить сопротивления z_A и z_C такими, чтобы соблюдалось указанное выше их фазовое соотношение

$$z_A = z_C e^{-j60}.$$

Сопротивление z_C может быть изготовлено в виде активного сопротивления $z_C = R$, а сопротивление z_A должно быть выбрано из условия

$$z_A = z_C e^{-j60} = Re^{-j60} = R(0,5 - j0,865) = \\ = 0,5R - j0,865R = r_A - jx_A,$$

где $r_A = 0,5R$ — активная составляющая сопротивления z_A;
$-jx_A = -j0,865R$ — его реактивная составляющая.

Сопротивление z_C может быть изготовлено в виде активного сопротивления R, исходя из номинальной вторичной нагрузки измерительных трансформаторов тока. Если, например, принять измерительные трансформаторы тока с номинальным вторичным током, равным одному амперу, с номинальной вторичной нагрузкой 30 Ом [П-7], то

$$z_C = R = 30 \text{ Ом}.$$

Тогда активная составляющая сопротивления z_A будет

$$r_A = 0{,}5R = 0{,}5 \cdot 30 = 15 \text{ Ом},$$

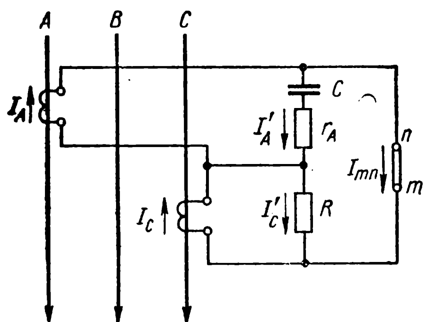


Рис. П-5. К расчету конструктивных параметров активно-емкостного фильтра тока обратной последовательности фаз для системы, не содержащей тока нулевой последовательности.

а реактивная (емкостная) составляющая

$$-jx_A = -j0{,}865R = -j0{,}865 \cdot 30 = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C},$$

или

$$0{,}865 \cdot 30 = \frac{1}{\omega C},$$

откуда

$$C = \frac{1}{0{,}865 \cdot 30 \cdot \omega} = \frac{1}{0{,}865 \cdot 30 \cdot 314} = 0{,}000122 \text{ Ф} = 122 \text{ мФ}.$$

Схема фильтра принимает вид (рис. П-5).

В условиях нормального режима, когда ток $I_{mn} = 0$, напряжение на конденсаторе при одном ампере вторичного тока

$$U_C = I_A \frac{1}{\omega C} = 1{,}0 \frac{1{,}0}{314 \cdot 0{,}000122} = 26 \text{ В}.$$

Напряжение на сопротивлении r_A

$$U_r = I_A r_A = 1{,}0 \cdot 15 = 15 \text{ В}.$$

Напряжение на трансформаторе тока фазы A

$$U_{\text{ф}A} = \sqrt{U_C^2 + U_r^2} = \sqrt{26^2 + 15^2} = \sqrt{900} = 30 \text{ В}.$$

Напряжение на трансформаторе тока фазы C

$$U_{\text{ф}C} = I_C R = 1{,}0 \cdot 30 = 30 \text{ В}.$$

Можно показать, что полученные напряжения $U_{фA}$ и $U_{фC}$, имеющие одинаковые численные значения, находятся в противофазе, что вполне согласуется с выражением (П.20). В результате их геометрическая сумма равна нулю, а следовательно, равен нулю и ток I_{mn}.

Полученные конструктивные параметры фильтра обусловлены номинальной нагрузкой выбранных измерительных трансформаторов тока. При других трансформаторах параметры фильтра будут другие. Может даже потребоваться промежуточная трансформация тока для уменьшения этих параметров.

Приложение III

РЕШЕНИЕ КУБИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

При решении кубических уравнений стараются прежде всего разложить их на множители, и когда это удается сделать, решение упрощается. В тех же случаях, когда это сделать не удается, приходится пользоваться другими, более сложными способами. Один из них приводится ниже с иллюстрацией на числовом примере.

Пример. *Дано:* уравнение третьей степени

$$a_0p^3 + a_1p^2 + a_2p + a_3 = 0,$$

где

$$a_0 = 3{,}76;\ a_1 = 12{,}83;\ a_2 = 11{,}16;\ a_3 = 11.$$

Тогда

$$3{,}76p^3 + 12{,}83p^2 + 11{,}16p + 11 = 0. \qquad (П.28)$$

Требуется: найти корни этого уравнения.

Решение.

Вообще уравнение третьей степени вида

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0 \qquad (П.29)$$

после деления на a и введения вместо x новой переменной

$$y = x + \frac{b}{3a}$$

принимает [П-6] вид

$$y^3 + 3\alpha y + 2\beta = 0, \qquad (П.30)$$

где

$$3\alpha = \frac{3ac - b^2}{3a^2} \text{ и } 2\beta = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a}.$$

Для решения уравнения (П.30) можно применить правило Кардана, в соответствии с которым его корни будут:

$$y_1 = u + v;\ y_2 = \varepsilon_1 u + \varepsilon_2 v;\ y_3 = \varepsilon_2 u + \varepsilon_1 v, \qquad (П.31)$$

где

$$u = \sqrt[3]{-\beta + \sqrt{\beta^2 + \alpha^3}}, \quad v = \sqrt[3]{-\beta - \sqrt{\beta^2 + \alpha^3}},$$

$$\varepsilon_1 = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \varepsilon_2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Пусть в уравнении (П.29) коэффициенты имеют значения:

$$a = a_0 = 3{,}76;$$

$$b = a_1 = 12{,}83;$$

$$c = a_2 = 11{,}16;$$

$$d = a_3 = 11.$$

Тогда множитель

$$3\alpha = \frac{3ac - b^2}{3a^2} = \frac{3 \cdot 3{,}76 \cdot 11{,}16 - 12{,}83^2}{3 \cdot 3{,}76^2} = \frac{125{,}9 - 164{,}6}{3 \cdot 14{,}14} = -\frac{38{,}7}{42{,}4} = -0{,}912,$$

откуда

$$\alpha = -\frac{0{,}912}{3} = -0{,}304.$$

Множитель

$$2\beta = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a} = \frac{2 \cdot 12{,}83^3}{27 \cdot 3{,}76^3} - \frac{12{,}83 \cdot 11{,}16}{3 \cdot 3{,}76^2} + \frac{11}{3{,}76} =$$

$$= \frac{2 \cdot 2112}{27 \cdot 53{,}16} - \frac{12{,}83 \quad 11{,}16}{3 \cdot 14{,}14} + \frac{11}{3{,}76} = \frac{4224}{1435} - \frac{143{,}2}{42{,}4} +$$

$$+ \frac{11}{3{,}76} = 2{,}94 - 3{,}38 + 2{,}93 = 2{,}49,$$

откуда

$$\beta = \frac{2{,}49}{2} = 1{,}245.$$

Определяем величины u и v:

$$u = \sqrt[3]{-\beta + \sqrt{\beta^2 + \alpha^3}} = \sqrt[3]{-1{,}245 + \sqrt{1{,}245^2 + (-0{,}304)^3}} =$$

$$= \sqrt[3]{-1{,}245 + \sqrt{1{,}55 - 0{,}028}} = \sqrt[3]{-1{,}245 + \sqrt{1{,}522}} =$$

$$= \sqrt[3]{-1{,}245 + 1{,}234} = \sqrt[3]{-0{,}011} = -0{,}223;$$

$$v = \sqrt[3]{-\beta - \sqrt{\beta^2 + \alpha^3}} = \sqrt[3]{-1{,}245 - 1{,}234} =$$

$$= \sqrt[3]{-2{,}479} = -1{,}345.$$

Корни вспомогательного уравнения (П.30) по (П.31) будут иметь следующие значения:

$$y_1 = u + v = -0,223 - 1,354 = -1,577;$$

$$y_2 = \varepsilon_1 u + \varepsilon_2 v = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-0,223) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \times$$
$$\times (-1,354) = 0,7885 + j0,9783;$$

$$y_3 = \varepsilon_2 u + \varepsilon_1 v = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-0,223) + \left(-\frac{1}{2} +\right.$$
$$\left. + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-1,354) = 0,7885 - j0,9783.$$

Возвратимся теперь от переменной y к исходной переменной x. Из условия обозначения новой переменной получаем

$$x = y - \frac{b}{3a}.$$

Тогда

$$x_1 = y_1 - \frac{b}{3a} = -1,577 - \frac{12,83}{3 \cdot 3,76} = -2,714;$$

$$x_2 = y_2 - \frac{b}{3a} = 0,7885 + j0,9783 - 1,137 = -0,3485 + j0,9783;$$

$$x_3 = y_3 - \frac{b}{3a} = 0,7885 - j0,9783 - 1,137 = -0,3485 - j0,9783.$$

Переходя теперь к обозначениям переменной в заданном уравнении (П.28), получим

$$p_1 = -2,714;$$

$$p_2 = -0,3485 + j0,9783;$$

$$p_3 = -0,3485 - j0,9783.$$

Проверку правильности полученных значений корней можно осуществить либо путем поочередной их подстановки в рассматриваемое уравнение (П.28), либо путем подстановки их значений в известные выражения для свойств корней кубического уравнения:

1) $p_1 + p_2 + p_3 = -\frac{a_1}{a_0}$;

2) $\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} = -\frac{a_2}{a_3}$;

3) $p_1 p_2 p_3 = -\frac{a_3}{a_0}$.

Во всех случаях должны получаться тождества.

Приложение IV

Основные технические характеристики отечественных АВМ

Основные технические характеристики АВМ	Типы машин													
	ИПТ-5	ЛМУ-1	МНБ-1	МН-7	МН-7М	«Аналог-1»	МПТ-9-3	«Электрон»	ЭМУ-10	МН-10М	МН-14-1	МН-17М	МН-18М	АВК-2(1)
Порядок решаемых уравнений	9	9	9	6	6	10	16	40—55	24	10	30	60	10	20
Число операционных усилителей	18	18	12	18	18	20	48	205	80	24	80	186	50	52
Число основных устройств для операций:														
задания постоянных коэффициентов	18	18	32	24	24	20	48	130	29	24	90	160	20	160
задания переменных коэффициентов	18	10	—	—	—	—	20	—	—	—	12	20	—	—
воспроизведения нелинейных функций одной переменной	—	—	4	2	4	1	—	15	4	—	20	10	10	6
перемножения с использованием диодных ячеек	—	—	4	2	4	1	—	15	4	6	50	12	8	8
воспроизведения специальных нелинейных зависимостей, функциональных и логических переключателей	—	—	4	1	1	—	—	30	20	6	24	34	5	6
воспроизведения тригонометрических функций	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	2	—	4
Число блоков запаздывания	—	—	—	2	2	—	—	—	4	—	3	2	—	2
Допустимая длительность интегрирования, с	150	200	200	200	200	10^3	200	10^4	10^3	200	10^4	10^3	10^3	10^3
Активные элементы:														
электронные лампы (ЭЛ)	ЭЛ	ЭЛ	ЭЛ	ЭЛ	ЭЛ	ЭЛ	ЭЛ	ЭЛ	ЭЛ	—	ЭЛ	ЭЛ	—	—
полупроводники (ПП)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПП	—	—	ПП	ПП
Общая масса, кг	200	250	150	200	200	170	1200	$4\cdot10^3$	900	35	$3\ 10^3$	$6\cdot10^3$	300	800
Занимаемая площадь, м²	1,0	1,0	3,0	0,6	0,5	0,3	7,6	9,5	3,5	0,2	10,0	12,0	2,0	1,0

Приложение V

Технические характеристики блоков нелинейных функций одной переменной (БН1П) и двух переменных (БН2П)

Характеристики	Типы блоков	
	БН1П	БН2П
Количество входов	1	2
Число отрезков	10	50
Диапазон рабочих частот, Гц	0—200	0—50
Входное сопротивление, кОм	50	200
Среднеквадратичная погрешность, %	0,7	2,0
Общая масса, кг	2,8	17

Технические характеристики блоков запаздывания

Характеристики	Типы блоков			
	БПЗ-1	БПЗ-2	БПЗ-2М	БРЗ
Диапазон изменения запаздывания, с	0,1—20	0,005—25	0,005—25	0—1 0—10
Число фиксированных значений запаздывания	80	150	150	9 поддиапазонов
Допустимое значение параметра ($\omega\tau$), рад	6,5	6,3	6,28	$<7{,}4$
Состав аппаратуры	Шесть операционных усилителей и два шаговых искателя	Семь операционных усилителей	Семь операционных усилителей	Следящая система БСС-3 и четыре операционных усилителя
Погрешность, %	3	3	3	2,5

Приложение VI

Процентные точки t-распределения Стьюдента (по табл. 4.9 из [17-15])

n	α				
	0,10	0,050	0,025	0,010	0,005
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660
120	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617

Примечание. Значения $\alpha = 0{,}995$; $0{,}990$; $0{,}975$; $0{,}950$ и $0{,}900$ получают, пользуясь соотношением $t_{n;\,1-\alpha} = -t_{n;\,\alpha}$.

Процентные точки распределения χ^2*

$P[\chi^2_n > \chi^2_{n;\,\alpha}] = \alpha$

n	α: 0,995	0,990	0,975	0,950	0,900	0,10	0,05	0,025	0,010	0,005
1	0,000039	0,00016	0,00098	0,0039	0,0158	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	0,0100	0,0201	0,0506	0,103	0,211	4,61	5,99	7,38	9,21	10,60
3	0,0717	0,115	0,216	0,352	0,584	6,25	7,81	0,35	11,34	12,84
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,06	7,78	9,49	11,14	13,28	14,86
5	0,412	0,554	0,831	1,15	1,61	9,24	11,07	12,83	15,09	16,75
6	0,676	0,0872	1,24	1,64	2,20	10,64	12,59	14,45	16,81	18,55
7	0,989	1,24	1,69	2,17	2,83	12,02	14,07	16,01	18,48	20,28
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	13,36	15,51	17,53	20,09	21,96
9	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	14,68	16,92	19,02	21,67	23,59
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	15,99	18,31	20,48	23,21	25,19
11	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	17,28	19,68	21,92	24,73	26,76
12	3,07	4,57	4,40	5,23	6,30	18,55	21,03	23,34	26,22	28,30
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	19,81	22,36	24,74	27,69	29,82
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	21,06	23,68	26,12	29,14	31,32
15	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	22,31	25,00	27,49	30,58	32,80
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	23,54	26,30	28,85	32,00	34,27
17	5,70	6,41	7,56	8,67	10,08	24,77	27,59	30,19	33,41	35,72
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	25,99	28,87	31,53	34,81	38,16
19	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	27,20	30,14	32,85	36,19	38,58
20	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	28,41	31,41	34,17	37,57	40,00
21	8,03	8,90	10,28	11,59	13,24	29,62	32,67	35,48	38,93	41,40
22	8,64	9,54	10,98	12,34	14,04	30,81	33,92	36,78	40,29	42,80
23	9,26	10,20	11,69	13,09	14,85	32,01	35,17	38,08	41,64	44,18
24	9,89	10,86	12,40	13,85	15,66	33,20	36,42	39,36	42,98	45,56
25	10,52	11,52	13,12	14,61	16,47	34,65	37,65	40,65	44,31	46,93
26	11,16	12,20	13,84	15,38	17,29	35,56	38,88	41,92	45,64	48,29
27	11,81	12,88	14,57	16,15	18,11	36,74	40,11	43,19	46,96	49,64
28	12,46	13,56	15,31	16,93	18,94	37,92	41,34	44,46	48,28	50,99
29	13,12	14,26	16,05	17,71	19,77	39,09	42,56	45,72	49,59	52,34
30	13,79	14,95	16,79	18,49	20,60	40,26	43,77	46,98	50,89	53,67
40	20,71	22,16	24,43	26,51	29,05	51,81	55,76	59,34	63,69	66,77
60	35,53	37,48	40,48	43,19	46,46	74,40	79,08	83,30	88,38	91,95
120**	83,85	86,92	91,58	95,70	100,62	140,23	146,57	152,21	158,95	163,65

* По табл. 4.8 из [17-15].

** При $n > 120$ $\chi^2_{n;\,\alpha} \approx n\left[1 - \frac{2}{9n} + Z_\alpha \sqrt{\frac{2}{9n}}\right]^3$, где Z_α — заданная процентная точка нормированного гауссовского распределения.

ЛИТЕРАТУРА

К главе первой

1-1. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М., «Энергия», 1967.

1-2. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. М., Госэнергоиздат, 1961.

1-3. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1956.

К главе второй

2-1. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М., «Энергия», 1967.

2-2. Фатеев А. В., Норневский Б. Н. Сборник примеров и задач по теории электрического привода. М., Госэнергоиздат, 1951.

2-3. Книга 95 ЦНИИТмаш. Справочные данные по электрооборудованию. М., Машгиз, 1960.

К главе третьей

3-1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М., Госэнергоиздат, 1963.

3-2. Хализев Г. П., Серов В. И. Расчет пусковых, тормозных и регулировочных устройств для электродвигателей. М., «Высшая школа», 1966.

3-3. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М., «Энергия», 1967.

3-4. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. М., Госэнергоиздат, 1961.

3-5. Книга 95 ЦНИИТмаш. Справочные данные по электрооборудованию. М., Машгиз, 1960.

3-6. Карвовский Г. А., Окорков С. П. Справочник по асинхронным двигателям и пускорегулирующей аппаратуре. М., «Энергия», 1969.

3-7. Сыромятников И. А. Режимы работы синхронных генераторов. М., Госэнергоиздат, 1952.

К главе четвертой

4-1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М., Госэнергоиздат, 1963.

4-2. Хализев Г. П., Серов В. И. Расчет пусковых, тормозных и регулировочных устройств для электродвигателей. М., «Высшая школа», 1966.

4-3. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. М., Госэнергоиздат, 1961.

4-4. Сыромятников И. А. Режимы работы синхронных генераторов. М., Госэнергоиздат, 1952.

4-5. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1956.

4-6. Берлсвский М. В. и др. Автоматическое управление и защита синхронных компенсаторов.— «Электрические станции», 1954, № 10.
4-7. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М., «Энергия», 1967.
4-8. Юдицкий С. Б. Синхронные машины с полупроводниковыми выпрямителями. М., Госэнергоиздат, 1954.
4-9. Каганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи. М., Госэнергоиздат, 1950.
4-10. Бруфман С. С., Трофимов Н. А. Тиристорные переключатели переменного тока. М., «Энергия», 1969.
4-11. Корытин А. М. и др. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Синхронные приводы. М., «Энергия», 1967.
4-12. Вешеневский С. Н. и др. Возбудители для электрических машин с применением тиристоров.— «Электричество», 1964, № 12.
4-13. Амелин Ф. Г. и др. Кремниевые вентили. Под ред. Юдицкого С. Б. М., «Энергия», 1968.

К главе пятой

5-1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М., Госэнергоиздат, 1963.
5-2. Эксплуатационный циркуляр Технического управления МЭС СССР № Э-17/54. М., 1954.
5-3. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1956.

К главе шестой

6-1. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1956.
6-2. Сиротинский Е. Л. Синхронизация на автоматических ГЭС.— В кн.: Сборник статей по автоматизации и телемеханизации гидростанций. М., Госэнергоиздат, 1950.
6-3. Байбаков Г. Н. Синхронизаторы с постоянным углом опережения на полупроводниках.— В сб.: «Вестник КПИ», т. 2, серия электроэнергетики, 1966.
6-4. Иванов Ю. И. Управление и автоматика в электроустановках энергосистем. К., «Техніка», 1967.
6-5. Чалый Г. В. Автоматические синхронизаторы типа АСУ-11 и АСУ-12.— «Вестник электропромышленности», 1952, № 8.
6-6. Вятских Б. Я. и др. Автоматический синхронизатор с постоянным временем опережения типа АСТ-4.— «Электрические станции», 1956, № 6.
6-7. Барзам А. Б. Системная автоматика. М., «Энергия», 1973.
6-8. Типовая работа ТЭП «Принципиальные схемы синхронизации». № 312-0506 ХО ТЭП, 1960.

К главе седьмой

7-1. Сыромятников И. А. Режимы работы синхронных генераторов. М., Госэнергоиздат, 1952.
7-2. Сборник директивных материалов Технического управления. Электрическая часть. М., Госэнергоиздат, 1952.
7-3. Элькинд Ю. М. Схемы и устройства для самосинхронизации синхронных машин. М., Госэнергоиздат, 1956.
7-4. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М., Госэнергоиздат, 1963.
7-5. Включение на параллельную работу синхронных генераторов и компенсаторов способом самосинхронизации. ЦНИЭЛ МЭС. М., Госэнергоиздат, 1952.
7-6. Малахова А. М., Элькинд Ю. М. Схемы и устройства для самосинхронизации генераторов.— «Электрические станции», 1951, № 8.

К главе восьмой

8-1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М., Госэнергоиздат, 1963.

8-2. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных двигателей. М., Госэнергоиздат, 1950.

8-3. Чернобровов Н. В. Релейная защита. М., «Энергия», 1966.

8-4. Барзам А. Б. Системная автоматика. М., «Энергия», 1964.

К главе девятой

9-1. Хромченко Г. Е. Высоковольтные выключающие аппараты. М., Госэнергоиздат, 1955.

9-2. Электротехнический справочник МЭИ, том I. М., Госэнергоиздат, 1955.

9-3. Афанасьев В. В. Конструкции выключающих аппаратов. Л., «Энергия», 1969.

9-4. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1956.

К главе десятой

10-1. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1956.

10-2. Элькинд Ю. М. Схемы и устройства для самосинхронизации синхронных машин. М., Госэнергоиздат, 1956.

10-3. Сыромятников И. А. Режимы работы синхронных генераторов. М., Госэнергоиздат, 1952.

10-4. Степунина А. С., Элькинд Ю. М. Схемы АПВ с самосинхронизацией линий 400 кВ. Труды ЦНИЭЛ, т. 2. М., Госэнергоиздат, 1954.

10-5. Мильгром И. Г. Трехфазное автоматическое повторное включение линий с самосинхронизацией для гидростанций.— «Электрические станции», 1951, № 10.

10-6. Кужирный А. А. и др. Защита гидрогенераторов от повышения напряжения.— «Электрические станции», 1952, № 2.

К главе одиннадцатой

11-1. Мамиконянц Л. Г. Использование асинхронных режимов генераторов для повышения надежности электроснабжения.— «Электричество», 1955, № 8.

11-2. Соколов Н. И., Хачатуров А. А. Автоматическое повторное включение без контроля синхронизма двух частей энергосистемы.— «Электричество», 1955, № 9.

11-3. Сыромятников И. А. Режимы работы синхронных генераторов. М., Госэнергсиздат, 1952.

11-4. Хачатуров А. А. Ударные токи и моменты при несинхронном включении генераторов.— «Электричество», 1956, № 2.

11-5. Горнштейн В. М. Условия восстановления синхронизма после нарушения устойчивости.— «Электричество», 1956, № 10.

11-6. Союзглавэнерго. О допустимых кратностях токов при несинхронном АПВ для генераторов, синхронных компенсаторов и трансформаторов.— «Электрические станции», 1961, № 11.

11-7. Эксплуатационный циркуляр Технического управления МЭС СССР № Э-5/55.— «Электрические станции», 1955, № 9.

11-8. Федосеев А. М. Основы релейной защиты. М., Госэнергоиздат, 1961

11-9. Барзам А. Б. Системная автоматика. М., «Энергия», 1973.

11-10. Барзам А. Б. Некоторые выводы из опыта несинхронного включения одиночных транзитных линий.— «Электричество», 1958, № 1.

11-11. Афанасьев В. В. Конструкции выключающих аппаратов. Л., «Энергия», 1969.

К главе двенадцатой

12-1. Зейлидзон Е. Д. Новое в автоматической частотной разгрузке энергосистем.— «Электричество», 1957, № 11.

12-2. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1956.

12-3. Москалев А. Г. Автоматическое регулирование частоты в энергосистемах. М., Госэнергоиздат, 1952.

12-4. Правила устройства электроустановок. М., «Энергия», 1964.

12-5. Москалев А. Г. Автоматическая частотная разгрузка энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1959.

12-6. Земляницын В. С. Устройство АЧР с автоматическим изменением уставки частоты срабатывания.— «Электрические станции», 1957, № 1.

12-7. ЦИНТИ электротехнической промышленности и приборостроения. Реле частоты типа ИВЧ-011А (каталог № 3835-А), 1961.

12-8. Елфимов В. М. Схемы автоматического включения потребителей после работы АЧР с одним реле частоты. — «Электрические станции», 1957. № 1.

К главе тринадцатой

13-1. Иносов В. Л., Цукерник Л. В. Компаундирование и электромагнитный корректор напряжения синхронных генераторов. М., Госэнергоиздат, 1954.

13-2. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М., Госэнергоиздат, 1956.

13-3. Барзам А. Б. Системная автоматика. М., «Энергия», 1973.

13-4. Беркович М. А., Семенов В. А. Основы автоматики энергосистем. М., «Энергия», 1968.

13-5. Баженов С. И., Бенин В. Л. Автоматическое регулирование в энергосистемах. К., «Техніка», 1966.

13-6. Цукерник Л. В., Костюк О. М., Рыбинский В. Е. Управляемое фазовое компаундирование синхронных машин с коррекцией по напряжению.— «Электричество», 1958, № 2.

13-7. Костюк О. М., Цукерник Л. В. Автоматические электромагнитно-полупроводниковые регуляторы возбуждения синхронных генераторов.— «Электрические станции», 1965, № 2.

13-8. Эксплуатационный циркуляр № Э-8/65. О временной защите от перегрузки роторов турбогенераторов с непосредственным охлаждением проводников обмотки. Министерство энергетики и электрификации СССР. М., 1965.

К главе четырнадцатой

14-1. Мееров М. В. Основы автоматического регулирования электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1952.

14-2. Егоров К. В. Основы автоматического регулирования. М., Госэнергоиздат, 1955.

14-3. Гизила Е. П. Расчет устройств автоматики энергосистем. К., «Техніка», 1969.

14-4. Гизила Е. П. К определению критерия устойчивости Найквиста—Михайлова.— В сб.: «Вестник КПИ», № 2, серия электроэнергетики, 1968.

14-5. Основы автоматического регулирования. Теория. Под ред. Солодовникова В. В. М., Машгиз, 1954.

14-6. Анисимов В. И. и др. Сборник примеров и задач по линейной теории автоматического регулирования. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

14-7. Попов Е. П. Динамика систем автоматического регулирования. М., Гостехиздат, 1954.

14-8. Айзерман М. А. Теория автоматического регулирования двигателей. М., Гостехиздат, 1952.

К главе пятнадцатой

15-1. Айзерман М. А. Теория автоматического регулирования двигателей. М., Госэнергоиздат, 1952.

15-2. Веников В. А., Литкенс И. В. Математические основы теории автоматического управления режимами энергосистем. М., «Высшая школа», 1964.

15-3. Гизила Е. П. Расчет устройств автоматики энергосистем. К., «Техніка», 1969.

К главе шестнадцатой

16-1. Основы автоматического регулирования. Теория. Под ред. Солодовникова В. В. М., Машгиз, 1954.

16-2. Диткин В. А., Кузнецов П. И. Справочник по операционному исчислению. ГИТЛ, 1951.

16-3. Айзерман М. А. Введение в динамику автоматического регулирования двигателей. М., Машгиз, 1950.

16-4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.—Л., ОГИЗ, 1948.

16-5. Гизила Е. П. Расчет устройств автоматики энергосистем. К., «Техніка», 1969.

16-6. Егоров К. В. Основы автоматического регулирования. М., Госэнергоиздат, 1955.

К главе семнадцатой

17-1. Анисимов Б. В., Голубкин В. Н. Аналоговые вычислительные машины. М., «Высшая школа», 1971.

17-2. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Под. ред. Соколова Н. И. М.—Л., «Энергия», 1970.

17-3. Витенберг И. М. Основные технические и эксплуатационные характеристики АВМ. Справочное пособие. М., «Машиностроение», 1972.

17-4. Витенберг И. М. Программирование АВМ. М., «Машиностроение», 1972.

17-5. Коган Б. Я. Электронные моделирующие устройства и их применение для систем автоматического регулирования. М., Физматгиз, 1963.

17-6. Кампе-Немм А. А. Решение инженерных задач на электронных моделирующих машинах. Л., «Энергия», 1970.

17-7. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов. Под ред. Веникова В. А. М., «Высшая школа», 1973.

17-8. Аналоговая и аналогово-цифровая вычислительная техника. Каталог изделий радиопромышленности, т. IV. М., НИИ Экономики и информации по радиоэлектронике, 1972.

17-9. Вычислительная техника. Справочник, т. I. Аналоговые вычислительные устройства. Под ред. Хаски Г. Д., Корна Г. А. М.—Л., «Энергия», 1964.

17-10. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М., «Наука», 1966.

17-11. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления. Под ред. Бесекерского В. А. М., «Наука», 1972.

17-12. Смолов В. Б. и др. Вычислительные машины непрерывного действия. М., «Высшая школа», 1964.

17-13. Витенберг И. М., Плотников В. Н. Применение электронных моделирующих машин для исследования и проектирования систем автоматического регулирования. М., 1962.

17-14. Коваленко И. Н., Филиппова А. А. Теория вероятностей и математическая статистика. М., «Высшая школа», 1973.

17-15. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., «Мир», 1971.

К приложениям

П-1. Фабрикант В. Л. Фильтры симметричных составляющих. М., Госэнергоиздат, 1950.

П-2. Фабрикант В. Л. Теория обмоток реле переменного тока. М., Госэнергоиздат, 1958.

П-3. Рене В. Т. Электрические конденсаторы. М., Госэнергоиздат, 1952.

П-4. Конденсаторы и сопротивления. М., БТИ, 1950.

П-5. Гизила Е. П. Расчет устройств автоматики энергосистем. К., «Техніка», 1969.

П-6. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.—Л., ОГИЗ, 1948.

П-7. Барзилович В. М. Высоковольтные трансформаторы тока. М., Госэнергоиздат, 1956.

П-8. Диткин В. А., Прудников А. П. Справочник по операционному исчислению. М., «Высшая школа», 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава четвертая. Расчет автоматического пуска синхронных двигателей и компенсаторов

Глава пятая. Расчет мощности неотключаемых двигателей по условиям самозапуска

Глава шестая. Расчет уставок автоматических синхронизаторов

Глава седьмая. Расчет самосинхронизации генератора

Глава восьмая. Расчет автоматического включения резервного трансформатора и резервного питания секции через реактор

Глава тринадцатая. **Расчет компаундирования синхронного генератора**

Глава четырнадцатая. **Расчет устойчивости систем автоматического регулирования с помощью критериев устойчивости**

Глава пятнадцатая. **Расчет областей устойчивости систем автоматического регулирования по способу Д-разбиения**

Глава шестнадцатая. **Расчет переходного процесса с помощью преобразований Лапласа**

Глава семнадцатая. **Расчет переходного процесса при помощи АВМ**

ГИЗИЛА ЕФИМ ПОЛИКАРПОВИЧ

РАСЧЕТ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Учебное пособие для студентов электроэнергетических факультетов вузов

Издательское объединение «Вища школа»
Головное издательство

Редактор В. В. Тронько
Обложка художника Г. М. Балюна
Художественный редактор С. П. Духленко
Технический редактор Т. И. Прилипко
Корректор Н. И. Токарева

Сдано в набор 5.07.1974 г. Подписано к печати 6.11.1974 г. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 2. Печ. л. 21,5. Уч.-изд. л. 22,12. Тираж 9000. Издат. № 1637. БФ 31148. Цена 93 коп. Зак. 4-306.

Головное издательство издательского объединения «Вища школа», 252054, Киев, 54, Гоголевская, 7.

Книжная фабрика им. М. В. Фрунзе Республиканского производственного объединения «Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, Харьков, Донец-Захаржевская, 6/8.